



João Pedro Gaio Fonseca Alves da Silva

Licenciado em Engenharia Geológica

Gestão de riscos aplicada a uma infraestrutura de armazenamento de resíduos mineiros

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientadora: Ana Paula Fernandes da Silva, Prof. Auxiliar, FCT/UNL
Co-orientadora: Maria da Graça Azevedo de Brito, Prof. Auxiliar,
FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas
Arguente: Doutor João Marcelino Mateus da Silva
Vogal: Prof.^a Doutora Ana Paula Fernandes da Silva

Gestão de riscos aplicada a uma infraestrutura de armazenamento de resíduos mineiros

Copyright@ João Pedro Gaio Fonseca Alves da Silva, 2015

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

O agradecimento sincero a todos aqueles que acompanharam a minha vida académica que culmina com a realização desta dissertação, em especial:

À Prof.^a Ana Paula Silva sem a qual a realização desta dissertação não seria possível. A minha gratidão pela disponibilidade e paciência para responder a todas as minhas dúvidas e incertezas, pela amizade, ensinamentos e conselhos partilhados ao longo destes anos de faculdade.

À Prof.^{ra} Graça Brito pela amizade e incentivo ao longo de todo o percurso académico e pela disponibilidade na revisão crítica deste trabalho.

A todos os professores que participaram na minha formação académica.

A todos os colegas de faculdade, que contribuíram para que este percurso fosse marcado por bons momentos e que fosse concluído com êxito.

À minha família, em especial aos meus pais e irmã, que de uma forma ou de outra contribuíram para que completasse com sucesso esta etapa longa e importante da minha vida.

Ao Gonçalo Matos, Miguel Cordeiro, Jorge Amaral e Ricardo Tomé, sem os quais o meu caminho não seria repleto de momentos inesquecíveis.

À Joana Lemos, pelo apoio, compreensão e motivação nos momentos mais difíceis, a quem devo muito do que alcancei e pretendo alcançar.

Resumo

A crescente preocupação da sociedade com a segurança e os riscos inerentes às mais variadas atividades faz com que a gestão de riscos, associada à necessidade de manter os riscos devidamente controlados e sob monitorização permanente, assuma um papel fundamental nas mais diversas intervenções, nomeadamente no âmbito das engenharias, embora recorrendo a diferentes metodologias e abordagens. Em Portugal, a sua aplicação a infraestruturas de aterro, em particular de armazenamento de rejeitados de minas, encontra-se ainda pouco desenvolvida, tendo-se manifestado na última década a necessidade de implementação deste tipo de gestão no contexto da construção e/ou exploração daquele tipo de infraestruturas.

Esta dissertação versa sobre o enquadramento geral de uma gestão de riscos geotécnicos e geoambientais aplicada a infraestruturas de armazenamento de rejeitados, tendo como objetivo expor os conceitos e definições necessários à sua aplicação, bem como as diferentes abordagens implementadas para este tipo de aterros, de forma a garantir um adequado controlo dos riscos inerentes. Destaca-se, em particular, a fase de avaliação de riscos, incluindo as duas etapas intrínsecas à mesma: a análise e apreciação de riscos.

Apresenta-se ainda a aplicação de uma metodologia de gestão de riscos, devidamente estruturada, a um caso de estudo hipotético da construção de um aterro de resíduos mineiros (sulfuretos), destacando e pormenorizando a etapa de avaliação de riscos.

Por fim, tecem-se algumas considerações sobre as vantagens e limitações da metodologia testada.

Palavras-chave: Gestão de riscos geotécnicos, Avaliação de riscos, Infraestruturas de armazenamento de rejeitados, Riscos geotécnicos e geoambientais

Abstract

The growing societal concern with the safety and risks involved in the different engineering activities makes the role of risk management crucial in most interventions, particularly those associated with the need to maintain the risks properly controlled and under constant monitoring, although using different methodologies and approaches. In Portugal its application in embankment infrastructures, especially in retention of mines tailings, is still undeveloped, being manifested in the last decade the need to implement this kind of management in the context of their construction and/or operation.

This dissertation focuses in the general framework of the management of geotechnical and geoenvironmental risks of tailings embankment infrastructures, having as objective expose concepts and definitions needed for its application, as well as the different approaches implemented for this kind of earthfill infrastructures, to ensure the appropriate control of the inherent risks. Particularly highlighted is the risk assessment phase, including both intrinsic steps to it: risk analysis and evaluation.

Also presented is an application of a risk management methodology, properly structured, to a hypothetical study case of a tailings mines (sulphides) embankment construction, giving detail and highlight to the risk assessment stage.

Finally, some considerations about the advantages and limitations of the tested methodology are registered.

Keywords: Geotechnical risk management, risk assessment, tailings dams, geotechnical and geoenvironmental risks

Abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas e siglas

AGS	<i>Australian Geomechanics Society</i>
AI	acontecimento iniciador
AIA	avaliação de impacte ambiental
ALARP	<i>as low as reasonably possible</i>
ANCOLD	<i>Australian Nacional Committee Of Large Dams</i>
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
<i>apud</i>	citado por
BHD	balanço hidrológico desfavorável
BS	<i>British Standard</i>
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens
CSB	Comissão de Segurança de Barragens
DCC	deficiente controlo da compactação
<i>e.g.</i>	<i>exempli gratia</i> (por exemplo)
EC7	Eurocódigo 7
EF	efeito
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
<i>et al.</i>	<i>et alia</i> (e outros)
ETA	análise de árvore de eventos
FMEA	análise do modo e efeito das falhas
FMECA	análise do modo, efeito e criticalidade das falhas
FTA	análise de árvore de falhas
HAZOP	análise dos perigos e da operacionalidade
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
IA	impactes ambientais
<i>ib.</i>	<i>ibidem</i> (no mesmo lugar)

ICOLD	<i>International Committee On Large Dams</i>
IE	impacto económico
IEC	<i>International Electronical Commission</i>
INAG	Instituto da Água
LCI	diagramas de localização, causa e indicadores das falhas
LTNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEJ	maciço estabilizador de jusante
MEM	maciço estabilizador de montante
NFL	nível da fase líquida
NFS	nível da fase sólida
NMC	nível máximo de cheia
nme	nível mínimo de exploração
NNA	nível de água na albufeira
NOIB	Normas de Observação e Inspeção de Barragens
NP	Norma Portuguesa
NPA	nível pleno de armazenamento
NPAR	nível pleno de armazenamento de resíduos
NSW DOP	<i>New South Wales Department Of Planning</i>
NSW DSC	<i>New South Wales Dams Safety Committee</i>
op. cit.	<i>opus citatum</i> (da obra citada)
PAR	<i>population at risk</i>
PEE	plano de emergência externo
PEI	plano de emergência interno
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SSH	saúde e segurança humana
TOR	<i>tolerability of risk</i>
UNEP	<i>United Nation Environmental Programme</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
USCG	<i>United States Coast Guard</i>
USCOLD	<i>United States Committee On Large Dams</i>
WISE	<i>World Information Service of Energy</i>

Símbolos

α_g	índice global de risco
α_i	descritores dos índices parciais do índice global de risco
Conf.	grau de confiança
D ₅₀	diâmetro da partícula a que correspondente 50% passado em massa total de todo o solo
E	índice parcial associado a fatores exteriores ou ambientais
Ef.	efeito
Fr	grau de fraturação
F	índice parcial associado à fiabilidade da barragem
F	probabilidade anual de um acidente com um número de fatalidade igual a superior a N
f	probabilidade anual de um acontecimento com o número de fatalidades N
IGI	índice global de impacto
k	coeficiente de permeabilidade
N	número de fatalidades
PE	perdas económicas
PPV	perda potencial de vidas humanas
R	índice parcial associado a fatores humanos e económicos
Ri	risco
Veros	verosimilhança
W	grau de meteorização
α_1	coeficiente de sismicidade

Índice de Texto

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do tema.....	1
1.2	Objetivos e metodologia.....	2
1.3	Organização da dissertação	2
2	Estado da arte	3
2.1	Conceitos e princípios fundamentais de barragens de rejeitados	3
2.2	Casos históricos de acidentes	6
2.3	Conceitos e princípios fundamentais da gestão de riscos.....	10
2.3.1	Risco.....	10
2.3.2	Perigo e vulnerabilidade.....	11
2.3.3	Acidente, incidente e falha	12
2.3.4	Rotura e modo de rotura.....	12
2.4	Etapas da gestão de riscos	13
3	Gestão de riscos.....	17
3.1	Análise de riscos.....	17
3.1.1	Índices de riscos	19
3.1.2	Diagramas de localização, causa e indicadores das falhas (LCI)	21
3.1.3	Análise de perigos e operacionalidade (HAZOP)	24
3.1.4	Análise do modo e efeito das falhas (FMEA) e sua criticalidade (FMECA)	26
3.1.5	Análise por árvore de eventos (ETA).....	30
3.1.6	Análise por árvore de falhas (FTA).....	32
3.2	Apreciação de riscos.....	36
3.2.1	Risco individual.....	37
3.2.2	Risco societal.....	40
3.3	Controlo de riscos.....	46
4	Caso de estudo hipotético.....	50
4.1	Proposta de metodologia	50

4.2	Descrição e enquadramento da barragem em estudo	52
4.2.1	Características geológicas regionais.....	54
4.2.1.1	Litoestratigrafia, tectónica e geomorfologia.....	54
4.2.1.2	Aspetos hidrogeológicos	54
4.2.1.3	Sismicidade	55
4.2.2	Trabalhos de prospeção realizados.....	55
4.2.3	Zonamento geotécnico	56
4.2.4	Plano de instrumentação.....	56
4.3	Avaliação de riscos.....	56
4.3.1	Análise de riscos por árvore de eventos (ETA).....	56
4.3.1.1	Caracterização do sistema	57
4.3.1.2	Seleção e análise do acontecimento iniciador	61
4.3.1.3	Construção das árvores de eventos.....	62
4.3.1.4	Determinação do risco.....	75
4.3.2	Apreciação de riscos semi-quantitativa.....	80
4.4	Controlo de riscos.....	83
5	Considerações finais e perspetivas futuras	86
5.1	Considerações finais.....	86
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	89
	Referências bibliográficas	90
	Anexos.....	94
	Anexo A – Glossário (adaptado CNPGB, 2005)	
	Anexo B – Fatores de apreciação das condições de risco (RSB, 1993)	
	Anexo C – Avaliação das perdas económicas e estimativa do número de pessoas em perigo (<i>Hughes et al.</i> , 2000 <i>apud</i> Pimenta, 2008)	

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Etapas do processo de tratamento do minério (adaptado de Robin Fell 2015).....	3
Figura 2.2 - Métodos de alteamento: a) montante; b) jusante; c) linha central	6
Figura 2.3- Distribuição dos incidentes por causas de falha, no mundo e Europa (adaptado de Rico, et.al., 2007).....	8
Figura 2.4 - Relação entre risco, perigo, vulnerabilidade e exposição (Crichton, 1999 apud Middelman, 2007).....	11
Figura 2.5 - Enquadramento do processo de gestão de riscos (adaptado de Santos, 2006; Pimenta, 2008).....	13
Figura 3.1 - Procedimento do método HAZOP (adaptado de IEC, 2001)	25
Figura 3.2 - Esquema ilustrativo da aplicação do método FMEA e respetiva representação da hierarquização dos sistemas, subsistemas e componentes	28
Figura 3.3- Esquema ilustrativo de parte de uma árvore de eventos simples (adaptado de CNPGB, 2005; Santos, 2006)	31
Figura 3.4 - Representação gráfica de uma árvore de falha simples	35
Figura 3.5 - Esquema ilustrativo dos critérios de aceitabilidade e tolerabilidade do risco individual segundo o HSE (adaptado de ICOLD 2005; Pimenta, 2008)	39
Figura 3.6 - Critérios de risco de tolerabilidade do risco individual propostos pelo USACE (2012)	40
Figura 3.7 - Critérios de risco da ANCOLD (2003).....	41
Figura 3.8 - Critérios de risco societal do USBR (USBR, 2011)	42
Figura 3.9 - Critérios de risco societal do USACE (USACE, 2012).....	43
Figura 3.10 Critérios de risco societal do DSC, Holanda, ANCOLD e DOP (McDonald, 2007).	43
Figura 4.1 - Metodologia de gestão de riscos proposta para o caso de estudo.....	50

Figura 4.2 - Esquema do perfil transversal da barragem.....	53
Figura 4.3 - Acontecimentos iniciadores.....	62
Figura 4.4- Árvore 1: Alteração química	63
Figura 4.5 - Árvore 2: Balanço hidrológico desfavorável (BHD).....	64
Figura 4.6 - Árvore 3a: Formações - estrutura	67
Figura 4.7 - Árvore 3b: Formações - fraturação.....	68
Figura 4.8 - Árvore 4a: Vento forte.....	69
Figura 4.9 - Árvore 4b: Vento forte	70
Figura 4.10 - Árvore 5: Arraste de finos do núcleo.....	71
Figura 4.11 - Árvore 6: Arraste de finos para os poços	72
Figura 4.12 - Árvore 7: Falha do sistema de bombagem dos poços.....	73
Figura 4.13 - Árvore 8: Vegetação excessiva.....	73
Figura 4.14 - Árvore 9: Deficiente controlo da compactação	74

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Diferenças entre barragens de água e barragens de rejeitados (adaptado de McLeod, et al., 2003)	4
Tabela 2.2- Vantagens e desvantagens dos principais métodos construtivos de alteamentos (Passos 2009, adaptado).....	6
Tabela 2.3 - Exemplos de acidentes em barragens de rejeitados reunidos pela USCOLD, UNEP e ICOLD (adaptado de ICOLD, 2011).	9
Tabela 2.4 - Definições dos vários tipos de risco (CNPGB, 2005).....	11
Tabela 3.1 - Síntese das características dos principais métodos de análise de riscos (adaptado de, Santos, 2006; Pimenta, 2008)	19
Tabela 3.2 - Classe de barragens de acordo com a ocupação humana, bens e ambiente (RSB, 2007)	21
Tabela 3.3 - Apreciação do índice global de impacto (CNPGB, 2006)	22
Tabela 3.4 - Exemplo de tipos de desvios e palavras-chave associadas na aplicação do método HAZOP (adaptado de IEC, 2001).....	25
Tabela 3.5 - Etapas dos métodos FMEA e FMECA (Santos, 2006)	26
Tabela 3.6 - Categorias de efeitos e respetivas componentes do sistema afetadas	29
Tabela 3.7 - Simbologia associada a eventos primários (adaptado de USCG 2000; CNPGB 2005; Santos, 2006; Pimenta 2008)	33
Tabela 3.8 - Simbologia das portas lógicas e dos elementos de transferência utilizadas nas árvores de falhas (adaptado de CNPGB, 2005; Santos, 2006; Pimenta 2008)	33
Tabela 3.9 - Risco aceitável de morte de um indivíduo por exposição a vários acidentes (Gulvanessian et al., 2002 apud Veiga Pinto, 2008).....	38
Tabela 3.10 – Classes de verosimilhança do risco (adaptado Robertson, et al., 2003)	44
Tabela 3.11 - Classes de severidade das consequências do risco (adaptado Robertson, et al., 2003)	45

Tabela 4.1 - Características gerais da infraestrutura	52
Tabela 4.2 - Famílias de diaclases identificadas junto ao eixo do aterro	54
Tabela 4.3 - Características das zonas pertencentes ao zonamento geotécnico	56
Tabela 4.4 - Estrutura do sistema do caso de estudo.....	57
Tabela 4.5 - Estrutura em pormenor do sistema principal II - Barragem.....	57
Tabela 4.6 - Funcionalidades das componentes básicas do sistema principal II – Barragem	58
Tabela 4.7 - Acontecimentos iniciadores organizados por componente básica	62
Tabela 4.8 - Modos de rotura dos subsistemas do caso de estudo	75
Tabela 4.9 - Classes de verosimilhança (adaptado de Robertson, et al., 2003).....	76
Tabela 4.10 - Classes de consequências (adaptado de Robertson, et al., 2003)	76
Tabela 4.11- Classificação dos modos de rotura quanto à verosimilhança de ocorrência e severidade das consequências.....	77
Tabela 4.12 - Matriz de risco da SSH	79
Tabela 4.13 - Matriz de risco do IA	79
Tabela 4.14 - Matriz de risco do IE.....	79
Tabela 4.15 - Análise do risco para o caso hipotético.....	80
Tabela 4.16 - Critérios de aceitabilidade e tolerabilidade do risco	81
Tabela 4.17 - Apreciação do risco para o caso hipotético.....	82
Tabela 4.18 - Medidas de controlo dos modos de rotura do caso de estudo	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

A presente dissertação, inserida no Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT/UNL), tem como principal intuito contribuir para a evolução da gestão de riscos geotécnicos e geoambientais inerentes a estruturas de retenção de resíduos mineiros.

Ao longo dos anos foi possível verificar que certas características das infraestruturas de armazenamento de resíduos mineiros fazem com que estas sejam especialmente vulneráveis, quando comparadas com as estruturas de retenção de água. Tal facto deve-se, sobretudo, à falta de regulamentação sobre critérios de construção específicos, falta de monitorização da estabilidade durante as várias fases da obra e ao elevado custo da respetiva manutenção, mesmo depois do fecho da atividade mineira. A grande maioria das falhas neste tipo de obras deve-se a causas meteorológicas (como chuvadas intensas), a operações inadequadas na sua zona de influência, a más práticas de gestão, como a falta de manutenção das estruturas de drenagem e ainda a roturas da fundação, geralmente originadas por inadequada construção e localização (Rico, et al., 2007).

A preocupação com os potenciais riscos inerentes a este tipo de estruturas tem vindo a aumentar consideravelmente devido aos acidentes que tem ocorrido nos últimos anos. Estas ocorrências demonstram a importância da prevenção deste tipo de eventos em vez de uma reação após o mesmo. Neste sentido, uma adequada metodologia de gestão de risco, tanto geotécnico como geoambiental, torna-se fundamental, consistindo num processo global, sistemático, de identificação, avaliação, mitigação e controlo por forma a reduzir os riscos para níveis aceitáveis (Cândido, 2010).

São vários os termos utilizados para referenciar este tipo de estruturas, *e.g.* aterro de retenção de rejeitados, barragem de rejeitados, infraestrutura de armazenamento de rejeitados, entre outros. No entanto o termo mais utilizado pela comunidade científica e o que será utilizado com maior regularidade nesta dissertação será barragem de rejeitados, respeitando o Decreto-lei nº10/2010 (2010) segundo o qual se regem as atividades relativas a este tipo de estruturas em Portugal.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Minimizar a probabilidade de ocorrência de acidentes e a redução dos seus efeitos é o principal objetivo de uma metodologia de gestão de riscos. Desta forma é indispensável uma constante atualização e melhoramento das técnicas e abordagens de uma gestão de riscos em barragens de rejeitados. Neste sentido propõem-se atingir os seguintes objetivos com a presente dissertação:

- Salientar a importância da aplicação de metodologias de gestão de riscos geotécnicos e geoambientais em barragens de rejeitados;
- Elaborar uma síntese e atualização do estado de arte associado à temática;
- Contribuir para a identificação de perigos geotécnicos e geoambientais potencialmente nocivos no contexto das barragens de rejeitados;
- Rever algumas técnicas de avaliação de risco quantitativas, qualitativas e semi-quantitativas;
- Aplicar os conhecimentos obtidos e uma metodologia de gestão de riscos a um caso de estudo hipotético.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução, enquadrando a temática abordada e descrevendo concisamente os objetivos propostos para este estudo.

No capítulo 2 são definidos e distinguidos os conceitos e princípios fundamentais envolvidos nas barragens de rejeitados e na gestão de riscos.

No capítulo 3 são descritas com maior pormenor as etapas intrínsecas ao processo de gestão de riscos, com ênfase para a etapa de avaliação de riscos.

No capítulo 4 é realizada a aplicação dos conceitos adquiridos a um caso de estudo hipotético de uma barragem de rejeitados em fase de projeto, que é caracterizada previamente.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais da dissertação e sugerem-se desenvolvimentos futuros no âmbito da temática abordada.

Por último, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas e os anexos que complementam a dissertação.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão introduzidos os principais conceitos e princípios fundamentais relacionados com as barragens de rejeitados e a gestão de riscos, bem como alguns casos históricos de acidentes de grandes dimensões. Será ainda realizado o enquadramento dos traços gerais em que se baseia uma gestão de riscos e as suas etapas: avaliação e controlo de riscos.

2.1 CONCEITOS E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DE BARRAGENS DE REJEITADOS

Os rejeitados das minas são o produto final do processo de extração e tratamento, decorridos após a extração do minério, ou após a separação do material sem valor económico do minério. Este procedimento envolve (Figura 2.1), normalmente, os processos de britagem e moagem, de lixiviação ou separação, seguido de uma desidratação ou espessamento antes de ser depositado na albufeira como uma lama (Fell, et al., 2015).

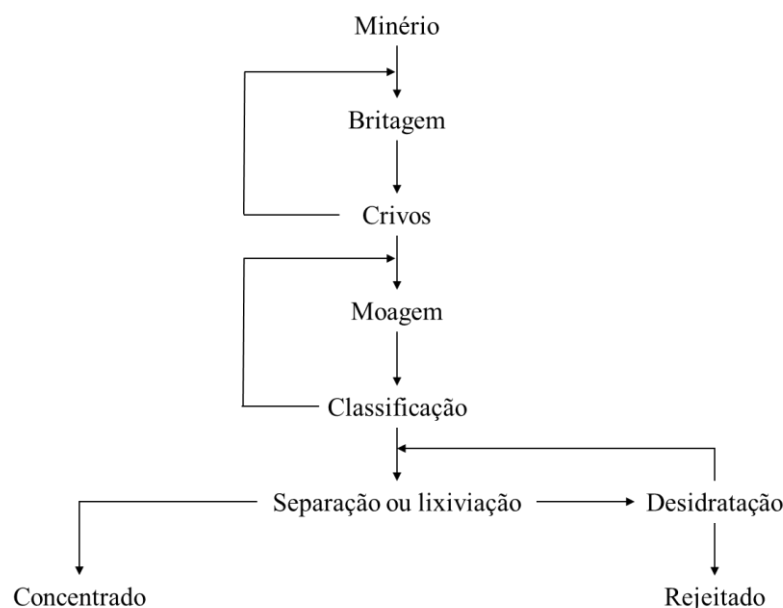


Figura 2.1 - Etapas do processo de tratamento do minério (adaptado de Robin Fell 2015).

As semelhanças entre as barragens de aterro construídas para o armazenamento de água e para armazenar os excedentes produzidos pelas minas são diversas, começando pelos próprios princípios de construção, particularmente quando existe a necessidade de armazenar água juntamente com os rejeitados, ou quando estes têm de ser protegidos por uma cobertura de água para evitar a poluição atmosférica (ICOLD, 2001).

As propriedades deste tipo de infraestruturas diferem consideravelmente consoante o tipo de minas em que têm origem os rejeitados, influenciando de forma distinta o tipo de comportamento mecânico apresentado pelos resíduos uma vez depositados. Deste modo, na formulação do projeto, a caracterização dos resíduos representativos resultantes do processo de extração deve ser efetuada com base em ensaios para determinar as propriedades necessárias à previsão do tipo de comportamento dos materiais que poderão constituir o aterro. No entanto, deve ser tido em atenção que os resultados produzidos por estes ensaios laboratoriais podem não ser verdadeiramente representativos dos produtos gerados pelo processo de tratamento real, tratando-se apenas de uma previsão aceitável do seu comportamento (Fell, et al., 2015).

Muitos dos princípios e práticas aplicadas nas barragens de armazenamento de água, convencionais, são aplicados às barragens de rejeitados; contudo, certas diferenças, sintetizadas na Tabela 2.1, podem beneficiar ou dificultar o projeto de dimensionamento de uma infraestrutura de aterro deste tipo. Uma linha de pensamento comum no dimensionamento de qualquer barragem é o facto de estas serem estruturas de engenharia e o facto de prevalecerem os princípios da mecânica dos solos (McLeod & Murray, 2003).

Tabela 2.1 - Diferenças entre barragens de água e barragens de rejeitados (adaptado de McLeod, et al., 2003)

Componente	Barragem de rejeitados	Barragem de água
Material armazenado	Rejeitados sólidos, água originada pelo processo de exploração (vários níveis de contaminação) e afluências	Água
Tempo de vida operacional	Tempo de vida finito (5 a 40 anos)	Tipicamente dimensionadas para 100 anos, mas “enquanto for preciso pela sociedade”
Período de construção	Faseada durante o tempo de vida da mina (2 a 25 ou mais anos)	Normalmente durante 1 a 3 anos
Encerramento	Período de encerramento infinito, tentativa de “walk away design”	Normalmente não especificado, mas a estrutura pode ser desmantelada
Engenharia	Nível médio a alto	Nível alto
Continuidade da engenharia	Varia: O dono e o projetista podem mudar frequentemente durante o tempo de vida da obra	Normalmente o projeto e construção ficam a cargo de apenas uma empresa de engenharia
Garantia de qualidade/Controlo de qualidade	Geralmente adequada para a barragem inicial construída, mas variável nas restantes operações de alteamento. Pode ser de nível fraco em algumas empresas mineiras mais pequenas/regionais	Nível elevado
Consequências da rotura	Danos físicos e contaminação ambiental resultante da onda de inundação de rejeitados libertados	Danos provocados pela onda de inundação
Eixo da barragem	Pode variar durante a fase de projeto, e.g. transição para método de linha central, ou método de montante	Normalmente mantem o eixo

No processo de realização do projeto de qualquer barragem de rejeitados existem três interesses essenciais que devem permanecer em equilíbrio, de acordo com as condições específicas da obra em questão: o custo; a estabilidade; e o desempenho ambiental (USEPA, 1994).

O tipo de materiais utilizados na construção de uma barragem deste tipo varia consoante as circunstâncias em que se encontra inserida, podendo ser utilizados os próprios rejeitados do processo de exploração ou materiais de empréstimo. Existem diferentes tipos de configurações dos aterros de retenção de rejeitados, sendo que a topografia do local é o principal fator que influencia a sua forma, existindo ou não a possibilidade de utilizar os declives naturais para a contenção dos rejeitados (*op.cit.*).

A construção de uma barragem de rejeitados é normalmente executada de forma faseada, tendo como razão principal a minimização dos custos iniciais e dar possibilidade à utilização dos próprios rejeitados, por depositar ou já depositados, como parte estrutural da barragem para os eventuais alteamentos futuros; no entanto, o dimensionamento do primeiro aterro deve antecipar este cenário (ANCOLD, 1999).

Existem três métodos principais de alteamento utilizados em barragens de rejeitados (Figura 2.2), método de montante; método de jusante; e método de linha central, que se descrevem em seguida:

- a) Método de montante:** Este é o método de alteamento mais antigo, simples e económico dos três mencionados. Começa pela construção de um aterro inicial, a partir do qual, os resíduos podem ser lançados através de canhões posicionados na crista do aterro em direção a montante. Estes rejeitados irão formar uma praia de deposição, que mais tarde, se tornará a fundação e, eventualmente, fornecerá materiais para o próximo alteamento da barragem. Este processo cíclico é utilizado até se atingir a cota prevista (Figura 2.2 – a).
- b) Método de jusante:** Este método tem requisitos similares aos das barragens de aterro convencionais de água. Tal como o método anterior, este também é iniciado pela construção de um aterro inicial com materiais de empréstimo compactados. Se forem utilizados materiais com baixo nível de permeabilidade será necessária a instalação de drenos incorporados no corpo do aterro inicial. Os alteamentos sucessivos realizados neste tipo de método são executados na direção de jusante do aterro inicial e assim sucessivamente até à cota final prevista (Figura 2.2 – b).
- c) Método de linha central:** Este método apresenta uma solução intermédia entre os dois tipos referidos acima, apresentando vantagens e minimizando as desvantagens entre os dois métodos, partilhando assim o aterro de partida e o lançamento de rejeitados a partir da crista da barragem formando uma praia. Os alteamentos seguintes a realizar com este método têm

a sua fundação tanto a montante, nos resíduos, como a jusante, no terreno natural (Figura 2.2 – c).

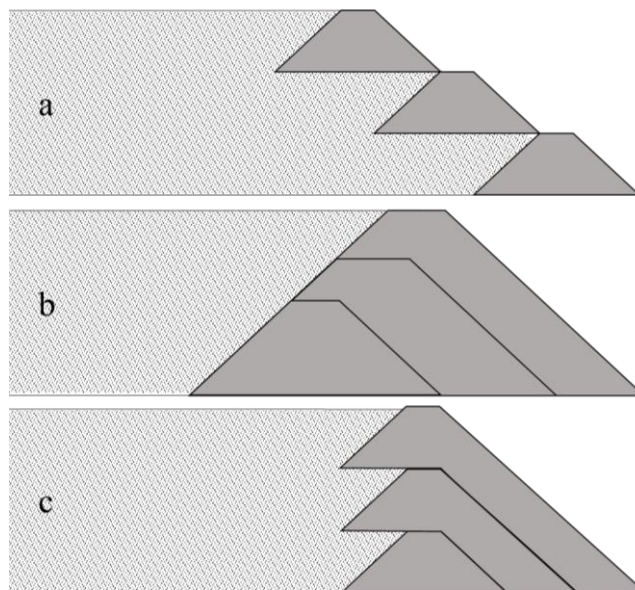


Figura 2.2 - Métodos de alteamento: a) montante; b) jusante; c) linha central

Na Tabela 2.2 apresentam-se, de forma resumida, as principais vantagens e desvantagens dos métodos construtivos descritos.

Tabela 2.2- Vantagens e desvantagens dos principais métodos construtivos de alteamentos (Passos 2009, adaptado)

Método	Montante	Jusante	Linha central
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo; Requer pouco material para o alteamento; Construção mais célere e simples. 	<ul style="list-style-type: none"> Resistência a efeitos dinâmicos; Facilita a drenagem; Menor vulnerabilidade à liquefação; Simplicidade de operação. 	<ul style="list-style-type: none"> Simplicidade de construção; Existência de um eixo constante; Custos aceitáveis.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> Baixo nível de segurança; Susceptibilidade à liquefação; Possui limite de altura; Possível ocorrência de <i>piping</i> entre dois aterros. 	<ul style="list-style-type: none"> Custo elevado; Quantidade grande de rejeitados necessários na fase inicial. 	<ul style="list-style-type: none"> Potenciais deslizamentos dos taludes.

2.2 CASOS HISTÓRICOS DE ACIDENTES

A vulnerabilidade inerente a este tipo de obras é uma realidade, e o número de acidentes registados ao longo dos anos comprovam este facto. A preocupação com a realização de uma correta gestão de risco para este tipo de obras de engenharia aumentou com o número e gravidade dos acidentes ocorridos.

Ao longo dos anos, várias investigações foram desenvolvidas na tentativa de fornecer dados estatísticos fidedignos quanto aos acidentes ocorridos por todo o mundo; no entanto, a falta de informações e a escassez de acidentes reportados, devido à ausência de obrigações legislativas para esse tipo de ocorrências, revelou-se um grande obstáculo à realização de uma base de dados representativa da realidade. As principais investigações executadas neste contexto foram efetuadas por entidades como *International Committee on Large Dams (ICOLD)*, *United States Commission on Large Dams (USCOLD)*, *U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)*, *United Nation Environmental Programme (UNEP)*, *World Information Service of Energy (WISE)*, na tentativa de fazer uma síntese dos acidentes ocorridos por todo o mundo, coligindo informações de todas as potenciais fontes (Rico, et al., 2007).

Num estudo realizado em 2007, cujo objetivo se prendia com a tentativa de melhorar a compreensão da distribuição dos acidentes em barragens de rejeitados e no estabelecimento de relações e tendências baseadas no histórico de acidentes neste tipo de obras na Europa, comparativamente com o resto do mundo, foi possível tirar as seguintes conclusões (Rico, et al., 2007):

- i. A Europa é a segunda zona com mais acidentes em barragens de rejeitados (14%), superada apenas pelos EUA (43%). O país europeu com maior incidência é o Reino Unido (56% dos 14%).
- ii. Todos os acidentes ocorridos na Europa correspondem a barragens com altura inferior a 45 m; destas, um terço ocorreu em barragens com altura entre 20 – 30 m.
- iii. Na Europa, a maioria dos acidentes teve como motivo causas meteorológicas – maioritariamente, níveis de precipitação anómalos (Figura 2.3). Existe uma baixa ocorrência de acidentes devido a liquefação sísmica, o que para o resto do mundo representa 14% das causas.
- iv. Mais de 85% dos acidentes ocorreram em infraestruturas ativas e, apenas 15%, em barragens abandonadas, não tendo sido reportados casos em barragens inativas com manutenção na Europa.
- v. O número de acidentes em barragens onde foram utilizados os métodos de jusante e montante é bastante semelhante (44% cada) na Europa; já em todo o mundo, o método de alteamento para montante apresenta uma percentagem maior com cerca de 66%.

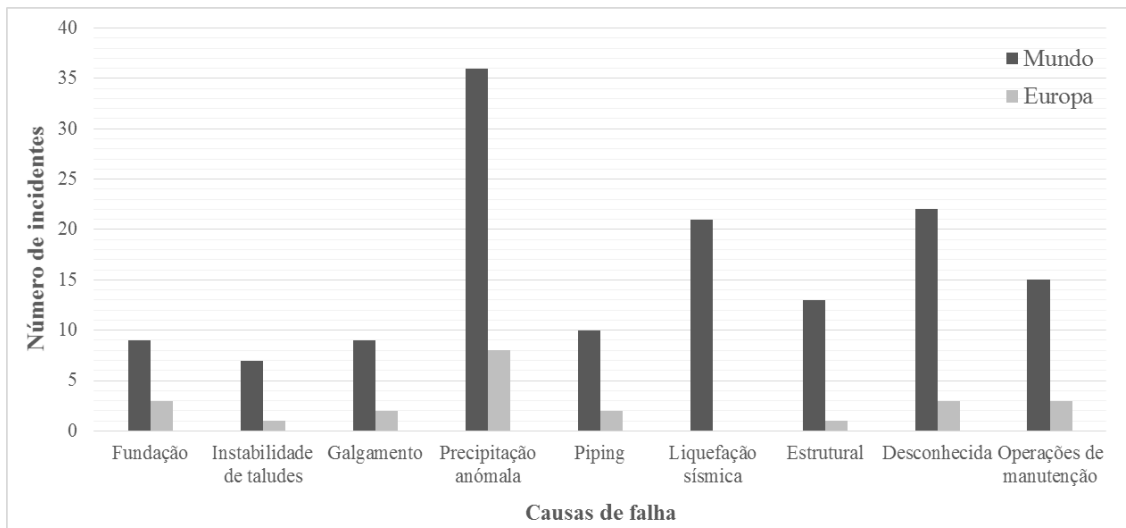


Figura 2.3- Distribuição dos incidentes por causas de falha, no mundo e Europa (adaptado de Rico, et.al., 2007)

Os acidentes em barragens atingiram um pico, de cinquenta eventos por década, entre os anos sessenta e oitenta; no entanto, assistiu-se a uma redução desse número, para vinte eventos por década, entre os anos noventa e 2010 (Azam & Li, 2010). Segundo os autores (*op.cit.*), este facto deve-se à intensa atividade mineira a que se assistiu após a Segunda Guerra Mundial, para responder à procura considerável de metais e minerais, sendo a redução desse número atribuída à implementação de medidas de segurança mais rígidas, ao avanço tecnologia da construção e ao aumento da experiência das empresas e entidades no dimensionamento destas estruturas.

Na Tabela 2.3 apresentam-se alguns exemplos de acidentes ocorridos ao longo dos anos, realçando a importância deste tipo de práticas e a necessidade da sua prevenção face às consequências sociais, ambientais e económicas resultantes deste tipo de eventos.

Para a realização desta tabela foram reunidos os acidentes com maiores consequências, tanto a nível de volume libertado como da sua severidade. Dos casos expostos destaca-se o acidente na barragem dos *Los Frailes* em Espanha, cujas consequências, relativamente ao impacto ambiental, foram consideráveis colocando sobre ameaça o Parque Nacional de *Doñana*. Este acidente teve por base problemas na fundação, tendo estes sido originados pela reação química entre os rejeitados ácidos e as formações carbonatadas existentes na fundação. Destaca-se ainda, devido ao grande número fatalidades (269 pessoas), o acidente em Itália, apesar do volume relativamente insignificante de rejeitados libertados.

Tabela 2.3 - Exemplos de acidentes em barragens de rejeitados reunidos pela USCOLD, UNEP e ICOLD (adaptado de ICOLD, 2011).

Nome da Mina/Local	Data do acidente	Tipo de minério	Método de alteamento	Material utilizado/tipo de barragem	Altura da barragem (m)	Volume de armazenamento (m³)	Tipo de acidente - causa	Volume libertado (m³)	Consequências
Bafokeng, África do Sul	1974	Platina	Montante	Rejeitados	20	13.000.000	Falha em barragem ativa - <i>piping</i>	3.000.000	-
Barahona, Chile	01-10-1928	Cobre	Montante	Rejeitados de areia ciclizada	61	20.000.000	Falha de barragem ativa – Sismo	2.800.000	-
Cities Service, Flórida, EUA	03-12-1971	Fosfato	Retenção	Aterro	12	12.340.000	Falha barragem ativa – Desconhecida	9.000.000	-
Tailings dam nº1, Omai, Guiana	19-08-1995	Ouro	Retenção	Enrocamento	44	5.250.000	Falha de barragem ativa – Erosão	4.200.000	-
Los Frailes, Sevilha, Espanha	24-04-1998	Zinco, Chumbo e Cobre	Retenção	Enrocamento	27	15.000.000	Falha de barragem ativa – Fundação	6.800.000	Contaminação de rios, de vários hectares de terras de cultivo e ameaça do Parque Nacional de Doñana
Balka Chuficheva, Rússia	20-01-1981	Ferro	Montante	Rejeitados de areia ciclizada	25	27.000.000	Falha de barragem ativa – Instabilidade de Taludes	3.500.000	-
Maritsa Istok 1, Bulgária	01-03-1992	Cinzas	-	Cinzas	15	52.000.000	Falha de barragem ativa – Erosão	500.000	-
Baia Mare, Roménia	30-01-2000	Ouro	Jusante/Montante	Rejeitados	-	800.000	Falha de barragem ativa – Estrutural	100.000	Contaminação de rios fontes de água potável e morte da fauna
Stava, Itália	19-07-1985	Fluorite	Montante	Rejeitados de areia ciclizada	29	300.000	Falha de barragem ativa – Instabilidade de taludes	190.000	Matou 269 pessoas e destruiu 62 edifícios
Kolontár, Hungria	04/10/2010	Bauxite	-	-	-	-	Falha de barragem ativa - Estrutural	700.000	Cerca de 8 quilómetros quadrados inundados, incluindo algumas áreas habitacionais; 120 pessoas feridas e 10 mortas

2.3 CONCEITOS E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA GESTÃO DE RISCOS

2.3.1 Risco

Existem diversas explicações e definições para o termo risco e para os conceitos associados à gestão de risco. A vasta e diversificada utilização deste tipo de metodologias nos diferentes contextos da geotecnia pode gerar divergências no que respeita à sua interpretação, já que os termos e metodologias diferem consoante a área em que se inserem, e o *background* do autor ou entidade.

De acordo com o ICOLD (2005):

Risco é uma medida da probabilidade e da severidade de um efeito adverso para a vida, para a saúde, para os bens materiais, ou para o ambiente. O risco é estimado pela esperança matemática das consequências de um evento adverso (e.g., o produto da probabilidade de ocorrência e das suas consequências) ou, alternativamente, pela conjugação de todos os conjuntos de três elementos, constituídos pelo cenário, pela probabilidade de ocorrência desse evento e pelas consequências associadas.

Segundo o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2007), presente no decreto-lei nº 344/2007, o risco de acidente ou incidente é definido como “o produto dos danos potenciais pela probabilidade de ocorrência do acidente ou incidente com eles relacionado”. Sendo que o termo danos potenciais é descrito como “as consequências de um acidente, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, as quais podem ser graduadas de acordo com as vidas humanas, bens e ambiente afectados”.

Os Eurocódigos (*EN – European Norm*) com aplicações ao tema em causa, nomeadamente EN 1990 (Bases para o projecto de estruturas) e EN 1997 (Projecto geotécnico), apresentam um modelo diferente das duas entidades referenciadas anteriormente, não referindo de forma explícita o conceito risco. As normas presentes nestes documentos têm como objetivo estabelecer princípios e requisitos de segurança e aptidão para obras geotécnicas, bem como bases para o dimensionamento e verificação, de modo a dar ao projeto uma certa fiabilidade estrutural (NP EN 1990, 2009; NP EN 1997, 2010).

De modo a evitar que diferentes interpretações criassem entraves ao estudo deste tema, a Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens (CNPGB) criou um glossário com termos associados a esta temática (Anexo A) de modo a serem compatíveis com os da ICOLD, designadamente os do boletim intitulado “*Risk assessment in dam safety management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications*”. Daqui em diante as definições descritas no respetivo documento serão as utilizadas nesta dissertação.

Neste sentido, na Tabela 2.4, define-se o conceito de risco e outros termos relacionados, segundo a CNPGB (2005)

Tabela 2.4 - Definições dos vários tipos de risco (CNPGB, 2005)

Conceito	Definição
Risco	Medida da probabilidade e da severidade de um efeito adverso relativamente à vida, saúde, bens e ambiente.
Risco involuntário	Risco imposto a indivíduos por uma entidade de controlo e não assumido como uma livre escolha pela população em risco.
Risco residual	O nível de risco remanescente em qualquer instante antes, durante e após ter sido implementado um programa de medidas de mitigação do risco.
Risco voluntário	Um risco que um indivíduo assume voluntariamente, de modo a obter algum benefício.
Riscos ambientais	Riscos associados aos ecossistemas naturais ou à beleza e amenidade da natureza.
Riscos comensuráveis	Riscos que são mensuráveis por padrões idênticos.
Riscos tangíveis	Riscos que, se ocorrerem, terão consequências detetáveis e, em geral, mensuráveis.

2.3.2 Perigo e vulnerabilidade

Os termos perigo e vulnerabilidade estão estreitamente relacionados com o conceito risco, sendo necessária a sua definição (Figura 2.5). Seguindo a mesma linha de pensamento, segundo a CNPGB, o termo perigo representa uma ameaça, ameaça esta que pode resultar de uma causa externa (*e.g.*, sismo ou causa humana) ou interna com potencial para promover uma rotura da estrutura, o que poderá causar perdas ou danos. Pode ainda advir de uma substância (*e.g.*, presença de arsénio em solos contaminados), uma geometria (*e.g.*, um talude ou uma massa de água) ou de uma pessoa (*e.g.*, negligência ou dolo). Inclui ainda fenómenos naturais como sismos, funcionamento deficiente de uma fonte de energia ou da atividade humana (*e.g.*, circulação rodoviária excessiva).

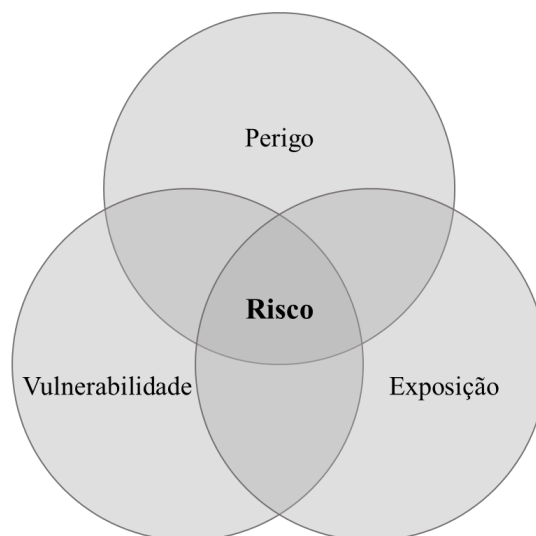


Figura 2.4 - Relação entre risco, perigo, vulnerabilidade e exposição (Crichton, 1999 apud Middelmann, 2007)

A vulnerabilidade é definida pelas condições que determinam a probabilidade e magnitude das consequências de um evento adverso (*e.g.*, a rotura da barragem). Trata-se de um conjunto de condições e processos resultantes de fatores físicos, sociais, económicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de um elemento ou conjunto de elementos sofrerem danos e perdas devido a perigos. Não surge de forma explícita na estimação de risco. Antes, a sua consideração é efetuada de modo implícito na avaliação da probabilidade da sequência de efeitos originada pela rotura (Santos, 2006).

2.3.3 Acidente, incidente e falha

Fora do contexto das barragens, pode definir-se acidente como sendo um acontecimento imprevisto, limitado no tempo e espaço, provocado pelo homem ou natureza, que se traduz em danos ou perdas. Já um incidente pode ser definido como um acontecimento que reduz significativamente a segurança devido ao potencial que detém de causar dano ou perda.

O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2007) refere acidente como sendo uma “ocorrência excecional cuja evolução não controlada é suscetível de originar uma onda de inundação”. Sendo o termo incidente definido como uma “anomalia suscetível de afetar, a curto ou longo prazo, a funcionalidade da obra e que implica a tomada de medidas corretivas”.

Faz então sentido considerar um acidente como um evento que leva a barragem à perda total das suas principais funcionalidades, reter e armazenar na sua albufeira, traduzindo-se na prática na libertação de uma onda de inundação. Já o termo incidente representa um acontecimento que, se mantido sob controlo, não reproduz a perda total das funcionalidades da barragem; no entanto, carece de retificação dos elementos afetados.

O termo falha, também utilizado de forma constante no âmbito da gestão de riscos, é caracterizado por uma deficiência que carrega a possibilidade de comprometer a função de um determinado componente ou subsistema da barragem (Pimenta, 2008).

2.3.4 Rotura e modo de rotura

O termo rotura é definido pela CNPGB (2005) como “a perda da capacidade de uma barragem, ou de parte dela, de funcionar como o previsto”. No seu funcionamento previsto estão incluídas a capacidade de garantir o abastecimento de água, a percolação excessiva ou a contenção de substâncias perigosas. No contexto da segurança da barragem, o termo rotura está confinado a aspetos de integridade estrutural, que em contextos especiais, inclui o caso extremo de colapso total ou parcial da estrutura.

Uma barragem é uma estrutura complexa constituída por diferentes elementos com diferentes modos de rotura associados. O modo como os elementos de um sistema estão interligados faz

com que a falha de um ou mais elementos se transforme na potencial rotura da estrutura. Sendo então o modo de rotura, a forma como as falhas das componentes devem ocorrer para que seja provocada a perda de funcionalidade dos sistemas ou subsistemas em análise (Santos, 2006).

2.4 ETAPAS DA GESTÃO DE RISCOS

Segundo a CNPGB (2005) a gestão de riscos consiste na aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de identificação, análise, apreciação, avaliação, mitigação e controlo de risco. Englobando ainda análises de custo/benefício das medidas que serão aplicadas com a vista à redução do risco.

O seu objetivo no âmbito de uma barragem é proteger a vida, a propriedade e o ambiente das consequências da respetiva falha, podendo este objetivo ser atingido com a aplicação e manutenção de uma gestão adequada (ANCOLD, 2003 *apud* Barker 2011).

A gestão de riscos deve então ser entendida como um conjunto de atividades empregues segundo uma dada estrutura organizada (Figura 2.6), para controlar de certa forma o risco que possa existir na execução de um projeto de qualquer âmbito em que existam riscos associados.

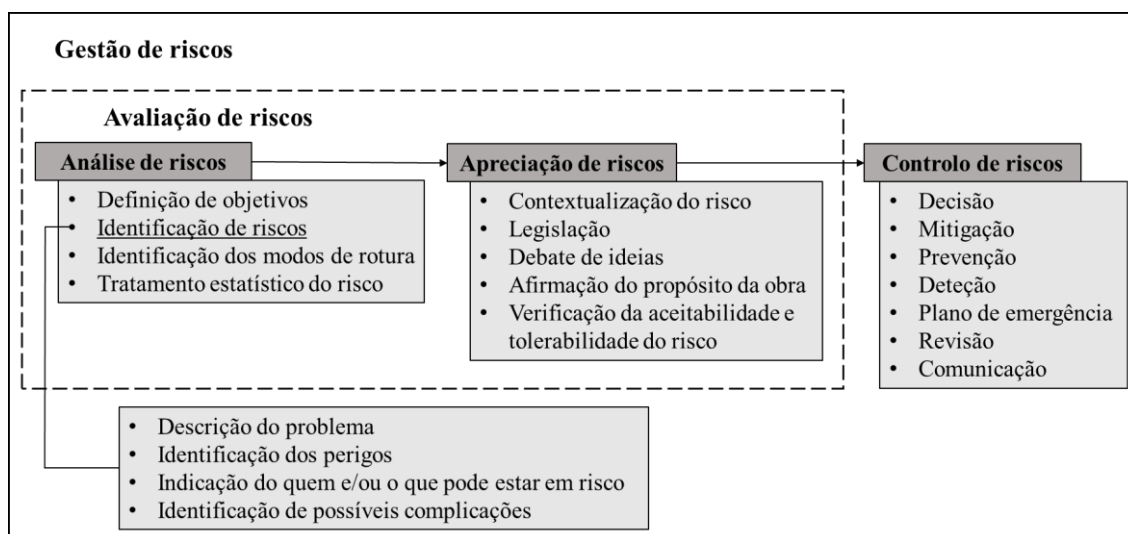


Figura 2.5 - Enquadramento do processo de gestão de riscos (adaptado de Santos, 2006; Pimenta, 2008).

O processo de gestão de riscos inicia-se com a avaliação de riscos, a qual se divide numa:

- Análise de riscos e,
- Apreciação de riscos.

Estas duas fases, incluídas na avaliação de riscos, serão tratadas com maior detalhe tendo em conta o âmbito desta dissertação, mantendo em segundo plano as restantes etapas existentes no processo de gestão de riscos.

Na fase seguinte à avaliação de riscos, é realizado um controlo de riscos, na qual são incluídas as medidas de mitigação e prevenção e ainda o plano de emergência.

a) Avaliação de riscos

A avaliação de riscos contribui para o processo de tomada de decisão sobre a tolerabilidade dos riscos envolvidos e/ou se as medidas de controlo de riscos aplicadas são adequadas aos mesmos para que, no caso de não se verificar essa tolerabilidade, possam ser implementadas medidas alternativas que cumpram com os objetivos da gestão de risco implementada (CNPGB, 2005).

Este processo envolve a análise e apreciação de riscos das quais resulta a comunicação, às partes interessadas no projeto, das consequências que se podem materializar de um acontecimento de rotura, aconselhando as mesmas quanto à tomada de decisão.

b) Análise de riscos

Uma análise de risco pode ser considerada um conjunto de procedimentos que tem como objetivo identificar os acontecimentos indesejáveis que levam à materialização dos riscos, bem como a análise dos mecanismos que despoletam esses acontecimentos e a determinação do comportamento dos componentes das estruturas e das respetivas consequências (Veiga Pinto, 2008).

De acordo com a CNPGB (2005), uma análise de riscos consiste na estimação do risco, relativamente a indivíduos, populações, bens e/ou ambiente, associado aos perigos existentes. A análise de riscos é usualmente composta pelas seguintes fases:

- Definição do âmbito;
- Identificação de riscos (i);
- Estimativa do risco.

i) Identificação de riscos

Nesta sub-etapa da análise de riscos, como o nome assim o sugere, são identificadas as fontes de perigo, evidenciando a sua origem e método de propagação. Um rigoroso reconhecimento de todas as causas com potencial, direto ou indireto, de originar danos ou perdas deve ser feito, não esquecendo como, e de que forma, esse perigo irá afetar o alvo em causa. Estão ainda incluídas na fase de identificação de riscos uma contextualização do problema em análise, bem como a identificação de possíveis constrangimentos à resolução do problema (Santos 2006; Cândido, 2008).

Existe uma grande dependência por parte da gestão de riscos no que diz respeito à identificação de riscos. Esta dependência é facilmente compreendida, uma vez que a falha na identificação de um determinado risco representa uma lacuna, mais ou menos grave, de todo o processo de gestão, podendo dar origem, em última instância, a um acidente com consequências gravosas.

c) Apreciação de riscos

A apreciação de riscos, de acordo com a CNPGB (2005), consiste no processo de ponderação e julgamento do significado do risco. Nesta fase entram inúmeros aspetos, tais como os objetivos do dono de obra, valores sociais, legislação, regulamentos, orientações normativas e os resultados das análises de riscos, assim, o processo de tomada de decisão é realizado conscientemente, formulando-se considerações quando à importância relativa dos riscos calculados e das respetivas consequências sociais, ambientais e económicas, com o objetivo de identificar e analisar as opções existentes no âmbito de uma gestão de risco (*op. cit.*).

É nesta fase que os processos de aceitação do risco são utilizados, dependendo desse julgamento dos valores éticos da pessoa ou sociedade que os aprecie. Todas as consequências económicas, ambientais, sociais e até mesmo culturais têm de ser consideradas, tornando-se especialmente importante esta investigação quando a possibilidade de perda de vidas humanas é uma realidade.

d) Controlo de riscos

O controlo de riscos é considerada a fase em que é realizada a implementação e imposição de medidas com o propósito de manter ou reduzir o risco, e a reavaliação periódica do sucesso dessas mesmas medidas (*ib.*). Nesta fase estão inseridas as medidas de prevenção e mitigação, cujo objetivo passa pela diminuição, respetivamente, da probabilidade e das consequências, para manter os riscos em níveis aceitáveis/toleráveis dependendo do contexto de toda a obra de engenharia e da própria gestão de riscos.

3 GESTÃO DE RISCOS

Neste capítulo serão aprofundadas as etapas inerentes à gestão de riscos, com especial destaque para as fases de análise e apreciação de riscos. Assim serão introduzidas as linhas gerais dos processos de análise de risco, bem como os diferentes métodos existentes para a sua aplicação e algumas das suas vantagens e limitações. Apresentam-se, ainda, as principais formas de apreciação de riscos, assim como alguns limites impostos em diferentes países e por diferentes entidades para o caso das barragens. Por fim, indicam-se linhas gerais de apoio à decisão quanto ao controlo de riscos.

A experiência e reconhecimento deste tipo de métodos e técnicas em certas áreas científicas já conta com largos anos de prática, nomeadamente na indústria aeroespacial, nuclear, entre outras (NASA, 2002). No entanto, o carácter singular das barragens de rejeitados faz com que a sua aplicação não possa ser executada de forma direta, exigindo um trabalho de base extensivo que fundamente a adaptação e/ou utilização sustentada das ferramentas existentes, como acontece para as restantes barragens (Pimenta, 2008).

O grau de incerteza associado às barragens de rejeitados destaca-as das barragens de água convencionais. A alteração das suas características ao longo da vida da obra, a constante evolução das técnicas de exploração e tratamento do minério, a mais fácil sobre-exploração das suas albufeiras e, no caso de rotura, um grau de consequências danosas superior, confere a estas estruturas um carácter singular.

Existem vários métodos e abordagens possíveis numa avaliação de riscos, sendo essencial tomar a decisão correta em relação à sua escolha (USCG, 2000). Neste sentido nas próximas secções, discutem-se as diferentes abordagens ao problema e os métodos aplicáveis à primeira fase de uma avaliação de riscos, a análise de riscos.

3.1 ANÁLISE DE RISCOS

Os métodos de análise de risco podem ser classificados em três grupos, consoante o tipo de análise que utilizam e ao produto final obtido pela sua utilização:

- Qualitativa;
- Quantitativa;
- Semi-quantitativa.

No relatório apresentado pela CNPGB (2005) encontram-se definidos estes três grupos. De acordo com este relatório, na realização de uma análise qualitativa é usada uma forma descritiva,

escrita ou em escalas de ordenação numérica, para ser efetuada a descrição da grandeza de consequências potenciais e a verosimilhança da ocorrência dessas consequências.

As análises semi-quantitativas utilizam classificações como, elevado, grande, baixo, entre outros, ou índices numéricos, de 1 a 5, para descrever a magnitude das consequências potenciais e a verosimilhança da ocorrência dessas consequências.

Por último, a análise quantitativa é baseada em valores numéricos, das consequências potenciais e da verosimilhança, desejando-se que tais valores sejam uma representação fiel da grandeza real das consequências e da probabilidade dos vários casos examinados.

Os métodos de análise de riscos podem ainda ser classificados em duas grandes categorias, de acordo com o tipo de abordagem de análise do sistema:

- Indutiva;
- Dedutiva.

A abordagem indutiva é iniciada pela detecção de uma falha ou condição inicial de um certo sistema, sendo posteriormente efetuada uma tentativa de averiguar o efeito dessa falha ou condição no desempenho do sistema. Ou seja, este tipo de análise parte de casos específicos para generalizações.

Por oposição, na abordagem dedutiva, o procedimento é efetuado do geral para o mais específico. Com isto entende-se que, neste tipo de análise, é considerada inicialmente uma rotura e tenta-se descobrir quais os eventos nos subsistemas que favoreceram essa rotura.

Na prática, numa análise de risco indutiva, pretende-se geralmente identificar quais os estados de rotura partindo-se do evento iniciador para a consequência. No caso das análises de risco dedutivas tem-se como objetivo inferir como se chegou a um certo estado de rotura iniciando-se pela consequência até ao evento iniciador.

Dentro destas classificações de tipos de análises de riscos existe um número significativo de métodos que utilizam diferentes tipos de abordagens e objetivos, sendo a sua escolha dependente de certas condições. Segundo Lichtenstein (1996, *apud* Gajewska & Ropel, 2011) cabe a cada organização decidir quais os fatores mais relevantes, de modo a proceder à escolha do método que melhor respeita os fatores de interesse. Na lista do autor (*op.cit.*) encontram-se fatores como o(a):

- Custo do uso do método – custo de utilização e do próprio método;
- Adaptabilidade – a necessidade de adaptar o método ao propósito da organização;
- Complexidade – quão limitado e simples é o método;
- Completo – o método carece de viabilidade;

- Viabilidade – o método deve ser compreensível;
- Validade – os resultados devem ser válidos;
- Credibilidade.

A aplicação de métodos quantitativos, devido à singularidade do projeto geotécnico que representa uma barragem, ainda apresenta algumas dificuldades em oposição aos métodos qualitativos e semi-quantitativos que, de uma forma geral, são aplicados usualmente em certos países (CNPGB, 2005).

Na Tabela 3.1 apresentam-se os principais métodos de análises de riscos, bem como algumas das suas características. Nas secções 3.1.1 a 3.1.6 é introduzida uma breve exposição desses mesmos métodos.

Tabela 3.1 - Síntese das características dos principais métodos de análise de riscos (adaptado de, Santos, 2006; Pimenta, 2008)

Métodos de análise	Tipo de análise	Raciocínio lógico	Fase de aplicação	Domínio de aplicação
Índices de riscos	sQt	Ind	Exploração	Grupo de barragens
LCI	sQt, Ql	Ind	Exploração	Barragem
HAZOP	sQt, Ql	Ind	Construção, Exploração	Subsistemas
FMEA	Ql	Ind	Projeto, Construção, Exploração	Barragem, Subsistema
FMECA	sQt	Ind	Projeto, Construção, Exploração	Barragem, Subsistema
ETA	Ql, sQt, QRA	Ind	Projeto, Construção, Exploração	Subsistemas
FTA	Ql, sQt, QRA	Ded	Projeto, Construção, Exploração	Subsistemas, Estado limite

Ind – indutivo; Ded – dedutivos; Ql – qualitativa; sQt – semi-quantitativa; QRA – quantitativa; LCI – diagramas de localização, causa e Indicadores das falhas; HAZOP – hazard and operability analysis; FMEA – failure modes and effects analysis; FMECA - failure modes effects and criticality analysis; ETA – event tree analysis; FTA – fault tree analysis

3.1.1 Índices de riscos

Classificados como métodos semi-quantitativos, os índices de risco têm por base uma abordagem indutiva para a determinação do valor do risco associado a uma obra de engenharia. De acordo com Pimenta (2008), estes métodos possuem uma aplicação simples e expedita, sendo preferencialmente utilizados em portfólios de barragens na sua fase de exploração com o objetivo de classificar e/ou hierarquizar barragens em função do risco, e para definir prioridades de forma consciente quanto à necessidade de implementação de medidas de prevenção, deteção, mitigação ou correção (*op.cit.*).

Segundo o ICOLD (2005), este tipo de métodos pode acrescentar valor na caracterização do risco na fase inicial de uma avaliação de risco, fornecendo informação suficiente para auxiliar de forma consciente um processo de decisão. Devido à consideração dos elementos chave de uma análise

de risco, tanto no que diz respeito à componente do risco associado à obra, como na componente de risco relativa às consequências de uma falha da barragem, os métodos de índices de risco são aplicáveis, tanto em barragens individuais como em portfólios (*op.cit.*).

De entre os vários métodos existentes, o método índice global de risco tem especial destaque em Portugal, estando definido pelo RSB nas Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB) presentes no decreto-lei nº 11/90, portaria 847/93 (RSB, 1993).

O índice global de risco, α_g , é calculado através de um conjunto de descritores (α_i) agrupados em três grupos de índices parciais:

1. Índice parcial associado a fatores exteriores ou ambientais (E):

$$E = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i \quad (3.1)$$

2. Índice parcial associado à fiabilidade da barragem (F):

$$F = \frac{1}{4} \sum_{i=6}^9 \alpha_i \quad (3.2)$$

3. Índice parcial associado a fatores humanos e económicos (R):

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=10}^{11} \alpha_i \quad (3.3)$$

Recorrendo ao quadro de fatores de apreciação das condições de risco (Anexo B) existente na portaria mencionada é possível classificar os descritores de forma qualitativa com valores que variam entre 1 e 6. Substituindo os valores dos descritores nas fórmulas acima apresentadas, obtém-se o valor dos três índices parciais. Por fim o índice global de risco é determinado pelo produto dos índices parciais calculados:

$$\alpha_g = E \times F \times R \quad (3.4)$$

As NOIB (*op.cit.*) propõem ainda a utilização do índice global de risco e dos índices parciais para a ordenação das barragens com vista ao estabelecimento de prioridades quanto à inspeção de barragens, classificando-as da seguinte forma:

- Classe A – barragens relativamente às quais pelo menos um dos índices parciais tenha o valor 6, correspondendo a condições anormais que obrigam a intervenção técnica;
- Classe B – barragens relativamente às quais o índice global tem um valor superior a 20 e o fator R maior ou igual a 3;

- Classe C – as restantes barragens.

Dentro da mesma classe a ordenação é executada com base nos seguintes pontos:

- Na classe A – em caso de igualdade no número de índices parciais de valor 6, deve considerar-se, sucessivamente, o valor de α_g , o valor de R e o valor de α_1 (corresponde ao descritor da sismicidade);
- Nas classes B e C – o valor de α_g , o valor de R e o valor de α_1 .

Com a revisão do RSB (2007) foi introduzida uma nova classificação para barragens que complementa as NOIB, tendo por base os danos potenciais associados a uma onda de inundação no vale de jusante (Tabela 3.2), tendo sido dado especial destaque à população residente no vale de jusante.

Tabela 3.2 - Classe de barragens de acordo com a ocupação humana, bens e ambiente (RSB, 2007)

Classe	Ocupação humana, bens e ambiente
I	Residentes em número igual ou superior a 25.
II	Residentes em número inferior a 25; ou Infra-estruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas.
III	As restantes barragens.

Como vantagens associadas a este tipo de métodos está a sua simplicidade de aplicação e a sua utilidade para a análise de portefólios de barragens; no entanto, a subjetividade inerente à classificação dos descritores pode ser um obstáculo, sendo importante a análise dos resultados obtidos de forma crítica.

3.1.2 Diagramas de localização, causa e indicadores das falhas (LCI)

O método de diagramas de localização, causa e indicadores das falhas, foi desenvolvido no Reino Unido com a finalidade de ser utilizado em análises de riscos em barragens, sendo apresentado como uma variante do método FMECA (Morris, et al., 2000). É considerado um método semi-quantitativo e adota uma abordagem indutiva.

É possível a divisão da aplicação deste método em duas etapas. A primeira etapa consiste na identificação e avaliação das consequências e a apreciação dos respetivos resultados, e na outra etapa é realizada a identificação e avaliação dos modos de rotura com capacidade para induzir uma onda de cheia no vale de jusante (Pimenta, 2008).

Na primeira etapa, tendo por base o conhecimento adquirido relativamente ao vale de jusante e aos níveis de água atingidos pela onda de cheia, é calculado o índice global de impacto (IGI) determinado pela equação (3.5). Este índice é calculado através da ponderação entre a perda

potencial de vias humanas (PPV) e as perdas económicas (PE), no vale próximo (primeiros 5 km) e no vale afastado (de 5 a 30 km).

$$IGI = 100.PE_{<5km} + PPV_{<5km} + 30.PE_{5-30km} + PPV_{5-30km} \quad (3.5)$$

A estimação do índice relativo à PPV é realizada com base no número de pessoas em perigo (PAR – *Population at Risk*), consoante os quatro tipos de ocupação possíveis (zonas residenciais, zonas construídas não residências, vias de comunicação e áreas recreativas). Por sua vez o PPV é calculado com base no PAR, através da equação (3.6) para o vale próximo e da (3.7) para o vale afastado:

$$PPV_{<5km} = 0,5.PAR \quad (3.6)$$

$$PPV_{5-30km} = PAR^{0.6} \quad (3.7)$$

A estimação do índice das PE é efetuada através da classificação das perdas de um conjunto específico de bens, associados aos diferentes tipos de ocupação. Sendo as PE calculadas através da soma ponderada das classificações atribuídas às perdas, tanto para o vale próximo como para o afastado. Os valores utilizados para o cálculo dos índices, tanto da PPV com das PE, referentes aos tipos de ocupação, são retirados da tabela presente no Anexo C.

Após a conclusão desta primeira etapa, possui-se o valor do IGI cujo resultado é normalmente sujeito a apreciação através da consulta da Tabela 3.3. Desta apreciação resulta a decisão de avançar ou não para a segunda etapa do método, bem como o nível de pormenor exigido. Para além da análise de roturas parciais e respetivas consequências, realizada na segunda etapa do método (nível I), a obtenção de um IGI maior que 750 (nível II) exige o recurso a modelos numéricos de propagação da cheia (CNPGB, 2006).

Tabela 3.3 - Apreciação do índice global de impacto (CNPGB, 2006)

IGI	Classificação	Estudos subsequentes
> 750	Impacto elevado	Nível II
175 a 750	Impacto médio	Nível I
< 175	Impacto baixo	-

Na segunda etapa é então efetuada a identificação e avaliação dos modos de rotura, organizando-os com base num diagrama LCI, cujo nome tem origem nas áreas do diagrama em árvore que relacionam a localização da componente da barragem, com a causa da rotura dessa componente e com os indicadores que permitem aferir os efeitos dessa rotura (Morris, et al., 2000).

Este método de análise de risco tem por base as conclusões retiradas das inspeções visuais realizadas à obra; no entanto, o nível de precisão da análise executada depende sempre da restante informação disponível.

Esta segunda etapa inicia-se pela atribuição de classificações às causas e aos indicadores das falhas através de três atributos, nomeadamente:

1. Efeito (Ef.): Como está relacionada a falha deste elemento (localização) com a completa ou parcial falha da barragem? Ou seja, este atributo relaciona o indicador induzido pela causa em análise de uma determinada componente (localização) com a rotura total ou parcial (classificação de 1 a 5, com 1 para efeito baixo e 5 para elevado);
2. Verossimilhança (Veros): Qual é a verossimilhança da falha deste elemento? Ou seja, a verossimilhança da rotura da componente (localização) tendo em conta a causa e o indicador em estudo (classificação de 1 a 5: 1 para verossimilhança baixa e 5 para elevada);
3. Grau de confiança (Conf.): Qual é a confiança na estimação do efeito e verossimilhança? Isto é, qual o grau de confiança do efeito e da verossimilhança, tendo em conta as incertezas no conhecimento da componente em análise (classificação de 1 a 5: 5 para confiança baixa e 1 para elevada).

De modo a simplificar a atribuição de classificações a estes atributos, realizam-se guias de classificação construídos através de uma análise pormenorizada dos desempenhos históricos das barragens sediadas no Reino Unido. Diferentes diagramas LCI são utilizados de acordo com a idade (antes de 1840, entre 1840 e 1960 e depois de 1960), altura (menos de 15 m, entre 15 a 30 m e mais de 30 m) e tipo de barragem (Morris, et al., 2000). A estrutura do diagrama mantêm-se para cada tipo de barragem diferindo apenas o guia de classificações conforme a idade e altura da mesma existindo, no entanto, a possibilidade de serem adicionados ou omitidos ramos dos diagramas propostos tendo em conta a especificidade do projeto em causa (*op.cit.*).

Após a aplicação dos diagramas LCI procede-se à ordenação dos conjuntos Localização/Causa/Indicador tendo como suporte os seguintes índices:

- i. Índice de ordenação: Produto das classificações do atributo efeito pelo atributo verossimilhança;
- ii. Índice de confiança: Igual ao grau de confiança;
- iii. Índice de criticalidade: Produto das classificações atribuídas ao efeito, à verossimilhança e ao grau de confiança.

Finalmente é possível calcular o índice de risco através do produto entre o índice de criticalidade e o índice global de impacto.

Segundo a CNPGB (2006), esta metodologia é considerada expedita, de aplicação pouco morosa e versátil, podendo ser aplicada a barragens cuja informação disponível é limitativa. Não obstante, quanto melhor for o processo de reunião de elementos relativos ao projeto, construção e exploração maior será a fiabilidade da análise.

3.1.3 Análise de perigos e operacionalidade (HAZOP)

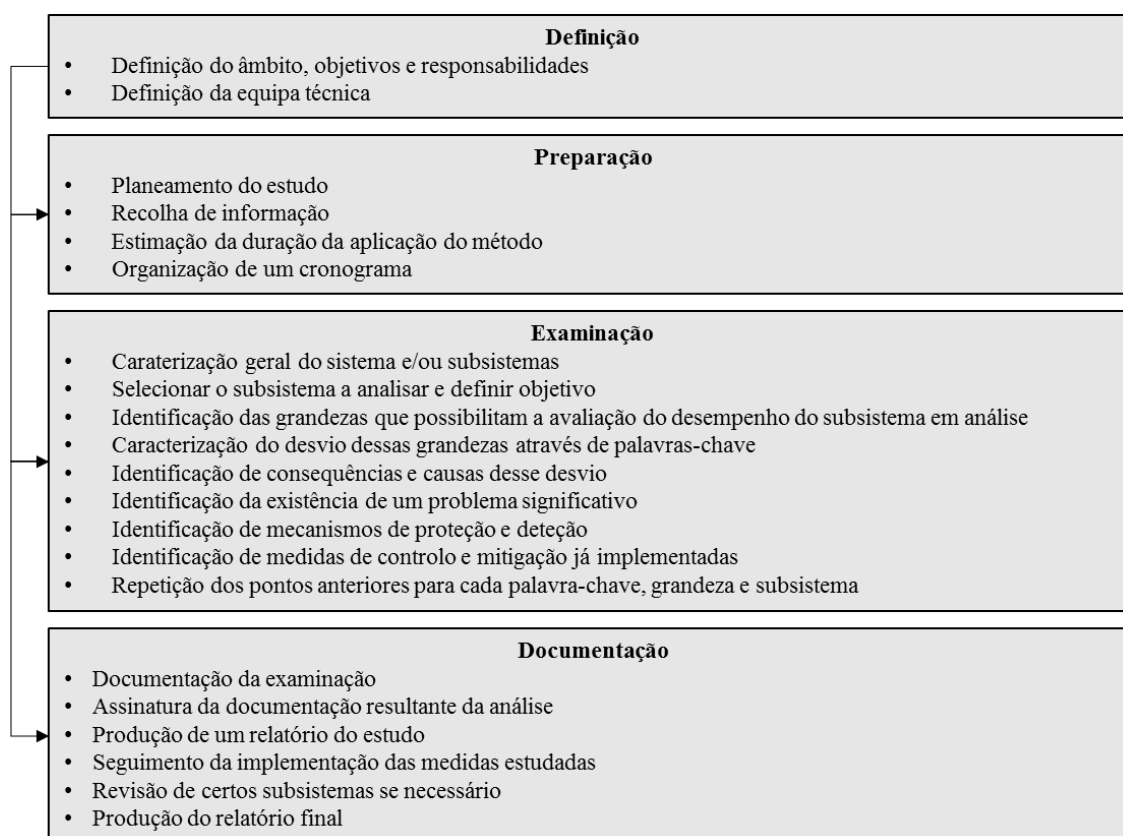
O método de análise de perigos e operacionalidade (HAZOP) teve origem também no Reino Unido, adotando uma abordagem indutiva. Embora tenha sido desenvolvido para apoiar análises quantitativas, ao longo dos tempos foram realizadas adaptações de modo a integrar este método em análises semi-quantitativas, através da avaliação da severidade dos riscos por intermédio de escalas de probabilidade e de gravidade (Santos, 2006; Pimenta, 2008).

Inicialmente desenvolvido nos anos 70 pela Sociedade Imperial de Indústrias Químicas, as sucessivas adaptações a outras áreas científicas deram a este método uma aplicação privilegiada na Engenharia de Barragens tanto na fase de construção, no sector das atividades de fiscalização, bem como na fase de exploração, no âmbito da análise de comportamento das obras a partir dos dados de observação (CNPGB, 2005). Pode, no entanto, ser aplicado também na fase de projeto, na concepção e pormenorização de determinadas componentes da obra e na elaboração das respetivas especificações técnicas de apoio à construção (*op.cit.*).

Inserido na família dos métodos de desvios, este centra-se na análise dos desvios de determinadas grandezas com repercussão no desempenho do sistema, com o objetivo de identificar as suas causas e efeitos e à definição de eventuais medidas de controlo, caso se revelem necessárias (Pimenta, 2008).

O procedimento HAZOP é constituído, regra geral, por quatro passos principais de acordo com a norma britânica de apoio à aplicação do método (IEC, 2001), como demonstrado pela Figura 3.1.

Figura 3.1 - Procedimento do método HAZOP (adaptado de IEC, 2001)



Segundo a mesma norma (*op.cit.*), na Tabela 3.4 apresentam-se alguns tipos de palavras-chave associadas aos diferentes tipos de desvios utilizados na maioria dos casos na aplicação deste método.

Tabela 3.4 - Exemplo de tipos de desvios e palavras-chave associadas na aplicação do método HAZOP (adaptado de IEC, 2001)

Tipo de desvio	Palavra-chave	Exemplo de interpretação
Negativo	Não	Nenhuma parte do objetivo é atingida
Modificação quantitativa	Mais	Aumento quantitativo
	Menos	Redução quantitativa
Modificação qualitativa	Superior	Execução de outra intenção não prevista
	Parcial	Cumprimento parcial da intenção
Substituição	Inverso	Inverso do sentido pretendido
	Diferente	Resultado diferente da intenção original
Tempo	Adiantado	O desempenho ocorre antes do previsto
	Atrasado	O desempenho ocorre depois do previsto
Ordem ou sequência	Antes	O desempenho ocorre antes do previsto numa determinada sequência
	Depois	O desempenho ocorre depois do previsto numa determinada sequência

As grandes vantagens normalmente associadas ao método de HAZOP são a sistematização do conhecimento adquirido ao longo do estudo da barragem, bem como das causas e efeitos dos desvios das grandezas que caracterizam os seus subsistemas e a sua aplicação simples e expedita,

nunca desprezando a necessidade de um conhecimento profundo do projeto em que será empregue. Este método apresenta como principal limitação o facto de não analisar explicitamente os modos de rotura associados aos desvios em análise (CNPGB, 2005; Pimenta, 2008).

3.1.4 Análise do modo e efeito das falhas (FMEA) e sua criticalidade (FMECA)

Com origem na indústria de armamento dos Estados Unidos da América nos anos 40, hoje o método FMEA tem uma vasta aplicação nas mais variadas áreas científicas (CNPGB, *op.cit.*). A abordagem indutiva adotada pelo método permite avaliar, estipulando um determinado modo de falha, as respetivas causas e sequências de efeitos (locais, noutros subsistemas e terminais), fundamentando desta forma a seleção de medidas de deteção e prevenção dos modos de falha e mitigação dos seus efeitos (*op.cit.*).

A FMEA é um método de análise de risco qualitativo sendo possível a sua extensão a análises semi-quantitativas, passando a designar-se por FMECA (análise do modo, efeito e criticalidade das falhas). A diferença entre estes dois métodos reside no facto de o primeiro apenas analisar o modo e efeito das falhas e o segundo permitir a quantificação da probabilidade de ocorrência e da magnitude das consequências para o sistema, relativo a cada modo de falha (ICOLD, 2005). Desta forma, a FMECA complementa a FMEA avaliando a criticalidade dos modos de falha através da aplicação de escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e da severidade dos efeitos.

Segundo Santos (2006), o método FMEA é estruturado genericamente pelas seis primeiras etapas referidas na Tabela 3.4. A introdução nesta tabela da extensão semi-quantitativa, FMECA, é executada pela etapa sete, sendo as restantes duas etapas referentes à possível tomada de decisões efetuada com base nos resultados do método aplicado.

Tabela 3.5 - Etapas dos métodos FMEA e FMECA (Santos, 2006)

Etapas dos métodos FMEA e FMECA
<ol style="list-style-type: none"> 1. Estruturação do sistema; 2. Definição das funções de cada componente do sistema; 3. Identificação dos modos potenciais de rotura associados a cada função de cada componente; 4. Identificação das causas potenciais; 5. Descrição dos efeitos diretos, nas demais componentes e no sistema; 6. Levantamento das medidas disponíveis para deteção dos modos de rotura ou das suas causas e controlo ou mitigação dos seus efeitos; 7. Avaliação de riscos para a situação atual da obra (FMECA); 8. Indicação das medidas a tomar para minimizar os riscos; 9. Avaliação dos resultados obtidos.

Nos pontos seguintes será realizada uma breve síntese dos aspectos básicos relativos a cada etapa do método (Santos, 2006).

- i) Estruturação do sistema: Nesta etapa é definido o grau detalhe, ou complexidade, que se quer implementar à descrição do sistema. Esta descrição é efetuada pela divisão do sistema em diferentes sistemas principais que, por sua vez, podem ser subdivididos em vários níveis de subsistemas até ser atingido o grau de detalhe pretendido (componente básica ou subsistema de fronteira) para a compreensão adequada dos modos de rotura dos vários elementos do sistema. Para a identificação dos sistemas, subsistemas e componentes básicas é utilizado um código numérico que localiza e diferencia a estrutura hierárquica (Figura 3.2), sendo que a este processo de estruturação está associado alguma subjetividade. Deste modo, a escolha do grau de detalhe merece especial atenção pelo facto do excessivo refinamento nesta etapa poder conduzir a graus de complexidade negativos para o restante procedimento, que não significam necessariamente uma análise melhor.

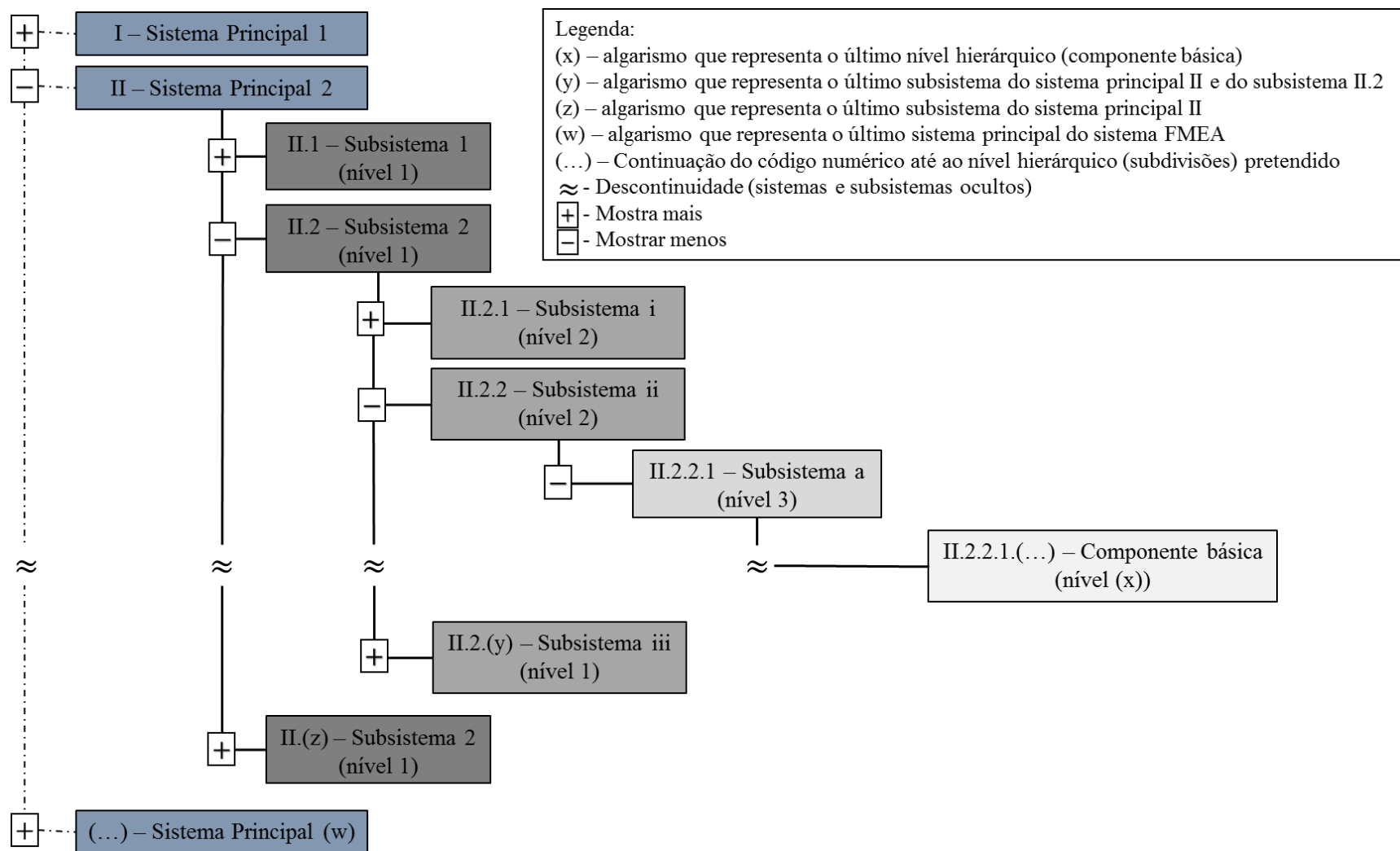



Figura 3.2 - Esquema ilustrativo da aplicação do método FMEA e respetiva representação da hierarquização dos sistemas, subsistemas e componentes

- ii) Definição das funções de cada componente do sistema: De modo a existir um correto funcionamento de todo o sistema, desde a componente básica a todos os subsistemas, é necessária a caracterização das funções básicas de cada componente do sistema.
- iii) Identificação dos modos potenciais de rotura associados a cada função de cada componente: Devido ao número significativo de modos potenciais de rotura que podem ser abrangidos numa FMEA, é muitas vezes necessário o confinamento das análises aos modos que representam risco significativo (Robertson, et al., 2003).
- iv) Identificação das causas iniciadoras: Nesta etapa é realizada a identificação das causas iniciadoras e dos modos de rotura contribuintes (modos de rotura de subsistemas de níveis inferiores causados por efeitos diretos de modos de rotura de subsistemas de nível superiores). Desta forma, é necessária a identificação dos perigos a que o sistema está exposto e das causas que levam a perda total ou parcial da funcionalidade do sistema, existindo diversas origens para as diferentes causas – fenómenos naturais, ação humana, deficiências na construção, entre outros.
- v) Descrição dos efeitos diretos, nas demais componentes e no sistema: A descrição dos efeitos dos modos de rotura deve ser executada para o subsistema em análise, para os subsistemas interferidos e para o sistema global. De modo a simplificar e categorizar os efeitos, estes são normalmente divididos em dois tipos (Tabela 3.5): efeitos diretos e efeitos indiretos, sendo que os efeitos diretos podem ser subdivididos em efeitos imediatos ou próximos. Já os efeitos indiretos podem ser designados por efeitos finais ou globais.

Tabela 3.6 - Categorias de efeitos e respetivas componentes do sistema afetadas

Efeitos		Consequências	
Efeitos diretos	Efeitos imediatos	Para a componente em análise	 Diminuição do nível de detalhe
	Efeitos próximos	Para outras componentes ou subsistemas de nível inferior	
Efeitos indiretos	Efeitos finais/globais	Para o sistema global	

- vi) Medidas de deteção e de controlo: Após as etapas anteriores é possível, recorrendo aos métodos e procedimentos disponíveis na obra, detetar as causas iniciadoras dos modos de rotura e, caso exista necessidade, controlar os efeitos no sistema.
- vii) Avaliação de riscos para a situação atual da obra: Esta etapa tem como principal objetivo a estimação da criticalidade de cada modo de rotura. Para superar o facto de não existirem dados suficientes para a realização de uma análise probabilística, são utilizados métodos

semi-quantitativos, nos quais, quer a probabilidade de ocorrência dos eventos quer a severidade das suas consequências no sistema, são ordenados por classes.

viii) Medidas de mitigação de riscos: A necessidade de implementação de medidas de mitigação depende da verificação da tolerabilidade dos riscos associados. No caso de existirem riscos intoleráveis e elevados é necessária a sua aplicação, atuando na diminuição da probabilidade de ocorrência dos eventos iniciadores ou na redução da severidade das consequências dos efeitos.

ix) Avaliação dos resultados obtidos: Posteriormente à aplicação das medidas de mitigação deve ser efetuada a verificação do seu sucesso, averiguando se houve diminuição do risco associado a todo o sistema e não apenas às componentes nas quais as medidas foram diretamente aplicadas.

Como considerações finais relativas aos métodos FMEA e FMECA, podem ser distinguidas como vantagens a sistematização e o carácter metódico da análise dos diferentes componentes do sistema, respetivas funções, modos de rotura, causas e efeitos, permitindo um conhecimento profundo de todo o sistema, bem como a possibilidade de atuar de forma consciente na deteção, prevenção e mitigação dos riscos. Normalmente, o carácter exaustivo associado a estes métodos, evidenciado pela complexidade de certos sistemas, constitui a sua principal desvantagem, tornando a aplicação destes métodos morosa e com custos elevados.

3.1.5 Análise por árvore de eventos (ETA)

Com origem no início dos anos 70, no apoio a análises de risco em centrais nucleares, a análise por árvore de eventos tem hoje uma vasta aplicação nas mais variadas áreas científicas (CNPGB, 2005). Classificado como um método indutivo de análise das possíveis consequências de um certo acontecimento iniciador, a ETA é particularmente apropriada para sistemas complexos onde existe a interação entre diferentes componentes/dispositivos de segurança (*op.cit.*).

Normalmente associado a análises quantitativas, este método pode no entanto ser aplicado em análises qualitativas e semi-quantitativas.

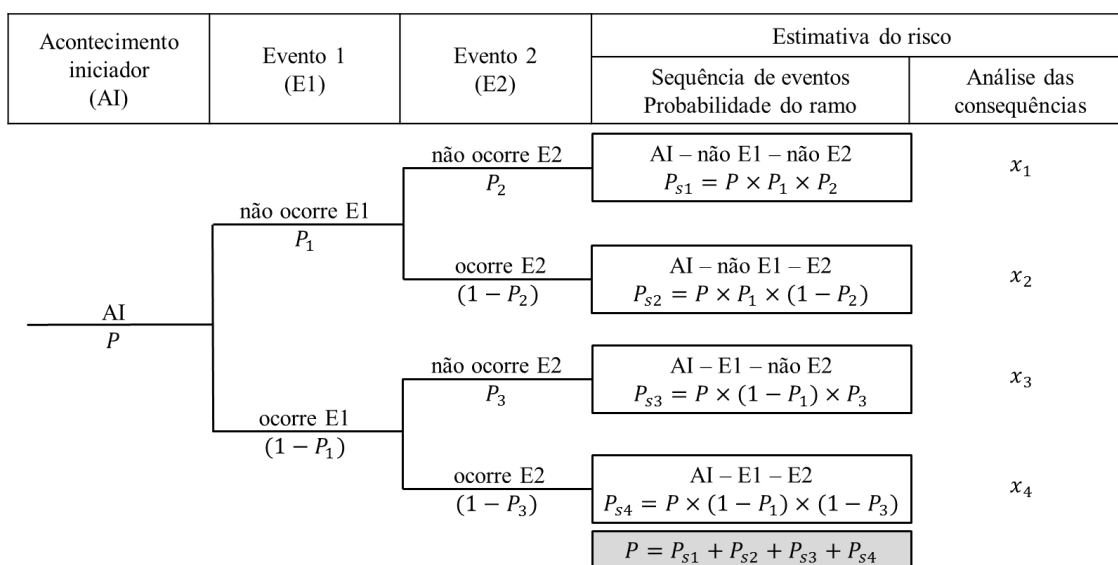
Na sua vertente quantitativa, a análise por árvores de eventos permite, a partir de um certo evento iniciador, identificar as consequências e probabilidades de ocorrência do mesmo (Santos, 2006; Pimenta, 2008). No caso da aplicação da ETA numa análise qualitativa ou semi-quantitativa, esta permite a representação de sequências possíveis de eventos, possibilitando a aplicação de medidas que interrompam essa sequência, funcionando essencialmente como um instrumento de conhecimento estruturado do sistema em análise (*op.cit.*).

As árvores de eventos para além de serem passíveis de aplicação em qualquer fase de vida de uma barragem – projeto, construção e exploração – podem ainda ser aplicadas num enquadramento pré-acidente, analisando a lógica de desempenho do sistema, e pós-acidente, analisando as consequências das diferentes sequências lógicas que podem ocorrer (Pimenta, *op.cit.*).

Segundo a CNPGB (*op.cit.*) e Pimenta (*op.cit.*) os procedimentos de aplicação gerais do método são os seguintes:

- i. Identificação e seleção do acontecimento iniciador a analisar;
- ii. Construção da árvore de eventos na qual cada ramo da árvore dá origem a dois ramos, que representam, a situação de sucesso (ocorre) e a situação de insucesso (não ocorre); cada sequência de eventos culmina numa situação que pode ou não corresponder a uma falha;
- iii. Cálculo da probabilidade de ocorrência do acontecimento iniciador bem como a probabilidade de ocorrência de cada evento. Em seguida, procede-se ao cálculo da probabilidade do ramo (sequência de eventos). No fim a probabilidade de sucesso do acontecimento iniciador culmina no sumatório das probabilidades de todos os ramos. Este passo existe no caso de análises semi-quantitativas ou quantitativas.

A representação do sistema de uma barragem numa árvore de eventos (Figura 3.3), pelo facto de ilustrar os efeitos e/ou estados (intermédios e finais) suscetíveis de ocorrer após surgimento de um acontecimento iniciador, permite estruturar de forma simples as sequências de rotura em partes, facilitando a intervenção direta em certas sequências com consequências ou probabilidades mais elevadas, podendo inclusivamente diminuir o tempo e custos de aplicação do método.



Legenda: P – probabilidade; x – classificação da consequência

Figura 3.3- Esquema ilustrativo de parte de uma árvore de eventos simples (adaptado de CNPGB, 2005; Santos, 2006)

Um dos benefícios da aplicação da ETA numa análise de riscos prende-se com o facto de, tal como no método FMEA, a estruturação do sistema permite adquirir um conhecimento aprofundado do sistema global da barragem, sendo a construção de uma árvore de eventos constitui por si só um processo instrutivo e elucidativo, desvendando aspetos que de outra forma poderiam passar despercebidos. Outro benefício deste método é o facto de evidenciar a eficácia ou ineficácia de certas medidas de controlo de riscos, uma vez que identifica os caminhos prováveis desde o evento iniciador à rotura.

Como limitação pode-se salientar que, devido à complexidade normalmente inerente ao projeto de uma barragem, existe a necessidade de realização de múltiplas árvores de eventos uma vez que cada árvore apenas refere um acontecimento iniciador, podendo isto tornar a sua aplicação morosa. Outro ponto importante de referir é o carácter subjetivo intrínseco ao método, onde duas equipas diferentes irão alcançar árvores de eventos diferentes para o mesmo sistema e ainda terão de superar o processo de identificação dos acontecimentos iniciadores e dos seus caminhos de sucesso e insucesso previamente à análise (Pimenta, 2008).

3.1.6 Análise por árvore de falhas (FTA)

Considerado um dos primeiros métodos de apoio a análises de riscos, a análise por árvores de falhas foi desenvolvida em 1961, pela empresa americana *Bell Telephone* e utilizada na avaliação de riscos de sistemas de lançamento de mísseis (CNPGB, 2005).

A análise por árvore de falhas é uma técnica, com aplicações em análises qualitativas ou quantitativas, que identifica dedutivamente que condições ou fatores podem contribuir para um evento específico indesejado (evento de topo), sendo o processo organizado de forma lógica e representado graficamente. As falhas identificadas na árvore podem ser eventos associados a falhas de equipamentos, erros humanos, ou qualquer outro evento que possa conduzir ao acidente específico em análise (USCG 2000; ICOLD, 2005).

Sendo este um método de abordagem dedutiva, funcionando do geral para o particular, uma vez conhecido o evento de topo retrocede-se progressivamente até ao evento originador, designado por evento primário – ver Tabela 3.6. No desenvolvimento vertical da árvore de falhas (de cima para baixo), existe uma sequência de eventos entre o topo e a base, designados por eventos intermédios, cuja interação é organizada através de operadores lógicos (E, OU e NEGAÇÃO) – ver Tabela 3.7. Esta abordagem faz com que este método seja muitas vezes utilizado também em análises de risco pós-acidente.

Tabela 3.7 - Simbologia associada a eventos primários (adaptado de USCG 2000; CNPGB 2005; Santos, 2006; Pimenta 2008)


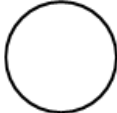
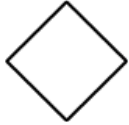





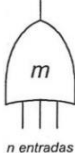
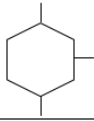


Símbolo	Evento	Descrição
	Intermédio ou de topo	Evento de topo correspondente ao evento indesejado a ser analisado. Evento intermédio corresponde aos estados do sistema ou ocorrências que de certa forma contribuem para o evento de topo.
	Básico	Acontecimento iniciador, falha inicial ou evento que não requer demais desenvolvimento. É o nível inferior dos ramos da árvore de falhas.
	Por desenvolver	Ramo que não é objeto de maior desenvolvimento por não ter importância relevante para a resolução desse evento, ou por não haver informação suficiente para continuar a ramificação.
	Condicionante	Condições específicas ou restrições que podem ser aplicadas a qualquer um dos operadores lógicos.

Tabela 3.8 - Simbologia das portas lógicas e dos elementos de transferência utilizadas nas árvores de falhas (adaptado de CNPGB, 2005; Santos, 2006; Pimenta 2008)

Símbolo lógico	Designação	Observações
	Porta E	O evento de saída ocorre apenas se todos os eventos de entrada ocorrerem.
	Porta OU	O evento de saída ocorre se ocorrer pelo menos um dos eventos de entrada.
	Porta OU exclusiva	O evento de saída ocorre se um único dos eventos de entrada ocorrer.
	Porta E condicional	O evento de saída ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem por ordem, da esquerda para a direita (caso especial da porta E).
	Porta m em n	O evento de saída ocorre se m dos n eventos de entrada ocorrerem.
	Porta Condicional	O evento de saída é resultado do evento de entrada se o evento condicional ocorrer (caso especial da porta E).
	Transferência para o interior	Indica que esse ramo da árvore de falhas está desenvolvido no elemento de transferência exterior correspondente (e.g., noutra página).
	Transferência para o exterior	Indica que esta porção da árvore de falhas deve ser anexada ao correspondente elemento de transferência interior.

A sua aplicação em análises qualitativas permite a obtenção de um conhecimento profundo do sistema global da barragem uma vez que, tal como no método FMEA e ETA, existe a necessidade de compressão dos modos de rotura potenciais que afetam o sistema para a construção da árvore de falhas. Quando aplicada em análises quantitativas, a FTA, permite quantificar a probabilidade do evento de topo e assim ter consciência da fiabilidade e operacionalidade de certas componentes do sistema.

Segundo a CNPGB (2005), os procedimentos gerais de aplicação do método de FTA são os seguintes:

1. Identificação da falha que se pretende analisar;
2. Construção da árvore de falhas;
3. Interpretação da árvore de falhas.

É importante referir que o procedimento apresentado representa apenas os passos gerais para aplicação do método, sendo que, para atingir o objetivo especificado em cada um dos três pontos são exigidas várias etapas, nas quais a sua complexidade varia em função da complexidade inerente ao sistema em análise.

Numa fase inicial, possivelmente incorporada na identificação da falha que se pretende analisar e elemento comum a qualquer método de análise de riscos, existe a necessidade de definir o sistema em análise, compreendendo o seu funcionamento, as suas interações e interligações entre os subsistemas e componentes integrados. No entanto, ao contrário do que acontece na aplicação da FMEA, não existe a necessidade de se realizar uma descrição do sistema tão detalhada, apesar de a sua execução beneficiar a análise de riscos. Outro ponto importante, normalmente abordado também nesta fase inicial, é a necessidade de definição das condições de operacionalidade do sistema, ou seja, definir as condições específicas a que o sistema está sujeito – condições externas como temperaturas, forças, nível de água na albufeira, entre outros, e se necessário definir fronteiras analíticas, definidas como limites impostos para demarcar o nível de resolução da análise, ou exclusão de certos eventos de modo a diminuir a complexidade da árvore.

Após a escolha do evento de topo, que constitui um modo de rotura particular do sistema, é necessário fazer a investigação de cada ramo em níveis sucessivos de detalhe. Segundo Santos (2006), nesta fase existem três etapas:

- i. Identificar os eventos imediatos, necessários e suficientes do evento de topo;
- ii. Identificar os eventos imediatos, necessários e suficientes dos eventos intermédios;
- iii. Passar para o nível de detalhe seguinte e repetir o ponto 2 até que todos os eventos na extremidade dos ramos da árvore sejam eventos primários.

No final desta fase e já com a árvore de falhas construída, procede-se à sua análise que, dependendo do objetivo e dados disponíveis, tanto pode ser quantitativa como qualitativa.

No caso de uma análise qualitativa parte-se da suposição de que todos os acontecimentos iniciadores são equiprováveis, analisando em seguida quais os que determinam sequências de eventos que se propagam através de portas lógicas do tipo **OU** (os que mais facilmente conduzirão à falha do sistema) e quais os que originam essencialmente sequências que se propagam através de portas lógicas **E** (os que mais dificilmente conduzirão à falha do sistema) (CNPGB, 2005).

A ocorrência de eventos iniciadores equiprováveis, principalmente em análises de riscos de barragens de rejeitados, não acontece na maioria das circunstâncias, sendo necessária a complementação da análise com a realização de uma interpretação quantitativa. Esta propõe estimar a probabilidade da falha em análise e das sequências e combinações de eventos, a partir da probabilidade de ocorrência dos acontecimentos iniciadores (Pimenta, 2008).

Na Figura 3.4 apresenta-se um exemplo de uma árvore de falhas simples, na qual se pode obter a seguinte interpretação:

- O Evento de topo ocorre se ocorrer o Evento 1 **OU** (porta lógica) Evento A;
- No entanto, para ocorrer o Evento 1, é necessário que ocorra o Evento 2 **E** (porta lógica) o Evento B;
- Sendo que para ocorrer o Evento 2, é preciso que ocorra o Evento C **OU** (porta lógica) D.

Desta interpretação pode-se concluir que, para ocorrer o Evento de topo, é necessário que ocorram as seguintes combinações de eventos: apenas o Evento A; o Evento B e C; o Evento B e D.

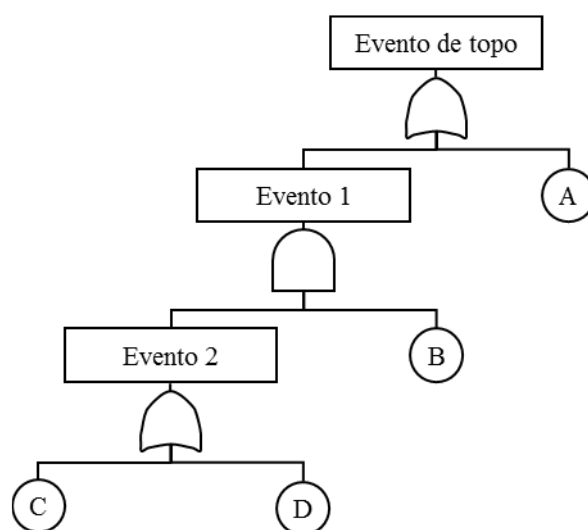


Figura 3.4 - Representação gráfica de uma árvore de falha simples

Assim, conclui-se que a uma FTA estão normalmente associadas vantagens como a representação gráfica, estruturada e lógica da análise dos modos de rotura do sistema (eventos de topo), a hipótese de utilizar programas de cálculo automático (auxílio na construção gráfica, cálculo da probabilidade de exemplos, etc.) e, como principal vantagem, nomeadamente para barragens de rejeitados, o facto de ser efetuada a análise de todas as combinações de eventos que conduzem à falha do sistema em análise, o que torna este método particularmente adequado ao tratamento de acidentes de dimensão significativa, que resultam frequentemente de um conjunto de eventos que individualmente não teriam capacidade para originar o acidente em causa.

No que diz respeito a desvantagens, tal como nos métodos FMEA e ETA, a complexidade normalmente inerente ao sistema de uma barragem pode contribuir para que a aplicação de uma FTA seja morosa, complexa e com custos elevados. A existência de diversos modos de rotura (eventos de topo), associados a estruturas geotécnicas deste tipo, fazem com que exista a necessidade de construção de inúmeras árvores de falhas e o envolvimento de uma equipa multidisciplinar.

3.2 APRECIÇÃO DE RISCOS

Designada como a fase na qual é realizado o julgamento quanto à aceitabilidade e tolerabilidade do risco, a apreciação de riscos é considerada uma das fases mais discutíveis de uma gestão de risco, uma vez que tem de conciliar interesses políticos, sociais e económicos, compatibilizando-os com aspectos normativos, legislativos e regulamentares.

No contexto de uma apreciação de risco é importante definir os conceitos de risco aceitável e tolerável. Um risco aceitável é aquele que todos os indivíduos que potencialmente serão afetados estão preparados para aceitar, assumindo que não existem alterações nos mecanismos de controlo do risco (HSE, 1995 *apud* ICOLD, 2005). Este risco é considerado insignificante e adequadamente controlado, sendo que não é necessária a sua redução adicional, a não ser que existam medidas praticáveis a baixo custo (ICOLD, 2005). Os riscos toleráveis são aqueles que, dentro de um certo intervalo, a sociedade aceita viver de forma a garantir certos benefícios. Este intervalo de risco não deve ser considerado insignificante ou ignorável, deve pelo contrário, ser mantido sobre análise e reduzido, se e/ou como for possível (HSE, 1999^a *apud* ICOLD, 2005).

A forma como as pessoas compreendem os riscos e aplicam julgamentos de valor é complexa (ICOLD, 2005). A perceção e a atitude perante o risco de um indivíduo ou sociedade varia consoante um grande número de fatores, tornando esta fase ainda mais controversa. Alguns estudos realizados no âmbito desta temática concluíram que certos fatores contribuem para a amplificação ou atenuação social do risco.

Segundo Kasperson et al. (1988, *apud* Pimenta, 2008) os fatores que contribuem para a amplificação do risco são:

- Novos riscos;
- Ocultação dos riscos por parte das autoridades;
- Falta de controlo dos riscos por parte das autoridades;
- Informação transmitida de forma alarmista e pouco fundamentada.

Já os riscos que contribuem para a atenuação dos riscos são (*op.cit.*):

- Riscos bem conhecidos;
- Relação de confiança entre o público e as autoridades;
- Riscos controlados pelas autoridades;
- Informação transmitida de forma objetiva e fundamentada.

Para além destes, características inerentes ao indivíduo como a sua idade, sexo, etnia, experiência de vida, contexto sociocultural, entre outros, também são fatores que influenciam a forma como um indivíduo age perante um risco – o seu *background*.

Dentro da temática importa então distinguir dois tipos de risco: o individual e o societal.

3.2.1 Risco individual

O risco individual é normalmente associado à probabilidade de perda de uma vida humana no seguimento de um determinado acidente. Esta é uma forma sugestiva de representar o risco, uma vez que permite a sua comparação imediata com diferentes tipos de acidente (Veiga Pinto, 2008).

Em barragens, a aceitabilidade de perdas de vidas é realizada em função da população em risco (PAR). Nesta população englobam-se todos os indivíduos que, no caso de rotura da barragem, não sejam evacuados (CNPGB, 2005).

No que diz respeito à aceitabilidade do risco individual existem diferentes valores estipulados por várias entidades e autores. Na Tabela 3.8 apresentam-se alguns valores de risco individuais aceitáveis para a morte de uma pessoa quando exposta a diferentes tipos de acidentes, expressos em termos de probabilidade anual de perda de vida.

Relativamente a barragens, segundo o ANCOLD (*apud* McDonald 2007), para barragens já construídas, o valor de risco individual aceitável máximo é de 10^{-4} por ano, exceto em circunstâncias excecionais. Para barragens em fase de projeto, ou seja novas, o valor de risco individual máximo é de 10^{-5} por ano, exceto em circunstâncias especiais. A aceitabilidade do risco individual para barragens no Reino Unido é de 10^{-6} por pessoa e por ano (Morris, et al., 2000).

Tabela 3.9 - Risco aceitável de morte de um indivíduo por exposição a vários acidentes (Gulvanessian et al., 2002 apud Veiga Pinto, 2008).

Acidentes	Risco ($\times 10^{-6}$ p.a.)*	Acidentes	Risco ($\times 10^{-6}$ p.a.)*
Acidentes em edifícios		Ocupação (UK)	
Rotura estrutural (UK)	0.14	Indústrias químicas e associadas	85
Incêndio em edifícios (AUS)	4	Construção naval e engenharia marítima	105
Desastres naturais (USA, 1969)		Agricultura	110
Furacões (1901-72)	0.4	Indústrias de construção	150
Tornados (1953-71)	0.4	Ferrovias	180
Sismos (Califórnia)	2	Minas de carvão	210
Acidentes em geral (USA, 1969)		Extração	295
Afogamento	30	Mineração (outras)	750
Fogos e queimaduras	40	Atividades <i>offshore</i> de petróleo e gás	1650
Acidentes rodoviários	300	Pesca submarina	2800
Todas as causas (UK, 1977)		Desportos (USA)	
Toda a população	12000	Exploração de grutas	45
Mulheres de 30 anos	600	Voos em planador	400
Homens de 30 anos	1000	Mergulho	420
Mulheres de 60 anos	10000	Asa delta	1500
Homens de 60 anos	20000	Paraquedas	1900

*O risco é expresso como a probabilidade de morte de uma pessoa com exposição normal durante um ano

Para além do valor de aceitabilidade, existe ainda a necessidade de definir o valor do risco tolerável. Neste seguimento, a HSE (2001 apud ICOLD, 2005) desenvolveu um esquema ilustrativo, Figura 3.5, para a tolerabilidade do risco (TOR), útil na explicação da relação entre a aceitabilidade e a tolerabilidade do risco. A largura da base do triângulo representa o nível crescente do risco para um determinado perigo, medido pelo risco individual e preocupações sociais. As três regiões presentes no esquema representam:

- Região intolerável: riscos são considerados inaceitáveis independentemente dos benefícios;
- Região tolerável: riscos considerados toleráveis a fim de garantir certos benefícios. Nesta região prevalece o princípio ALARP, apresentado subsequentemente;
- Região aceitável: risco é considerado banal e devidamente controlado.

Um dos princípios utilizados usualmente no apoio à decisão quando a aceitabilidade do risco é o princípio ALARP (*As Low As Reasonably Practical*). Esta ferramenta de apoio, estabelece que os riscos, inferiores ao limite de tolerabilidade, só são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a essa redução forem fortemente desproporcionados (dependendo do nível de risco) relativamente aos benefícios daí decorrentes (CNPGB, 2005).

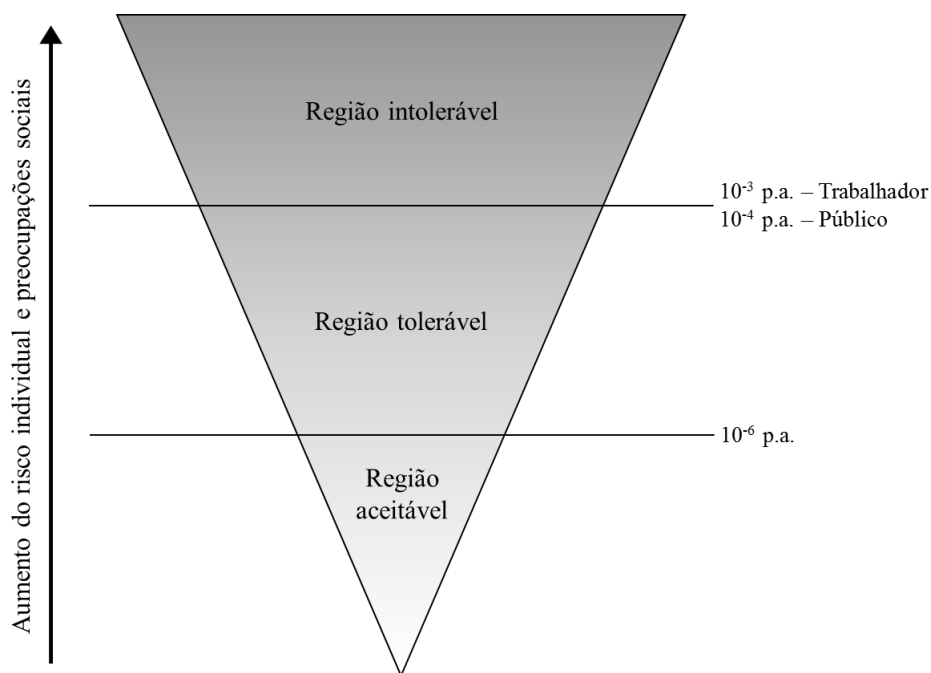


Figura 3.5 - Esquema ilustrativo dos critérios de aceitabilidade e tolerabilidade do risco individual segundo o HSE (adaptado de ICOLD 2005; Pimenta, 2008)

Na Figura 3.6 apresentam-se os critérios de tolerabilidade propostos pelo USACE (2012). Pela comparação entre os critérios propostos pelo HSE (*op.cit.*) e USACE (*op.cit.*) verifica-se que ambos recomendam o mesmo limite de tolerabilidade (10^{-4}), sendo que a grande diferença reside no facto dos critérios propostos pelo USACE não possuírem região aceitável. Desta forma, para valores inferiores ao limite de tolerabilidade (10^{-4}), entra-se na região tolerável, sendo que existe a necessidade de respeitar o princípio ALARP, contrariamente aos critérios do HSE em que só é necessário respeitar o princípio ALARP no intervalo de valores $[10^{-4}, 10^{-6}]$ – região tolerável.

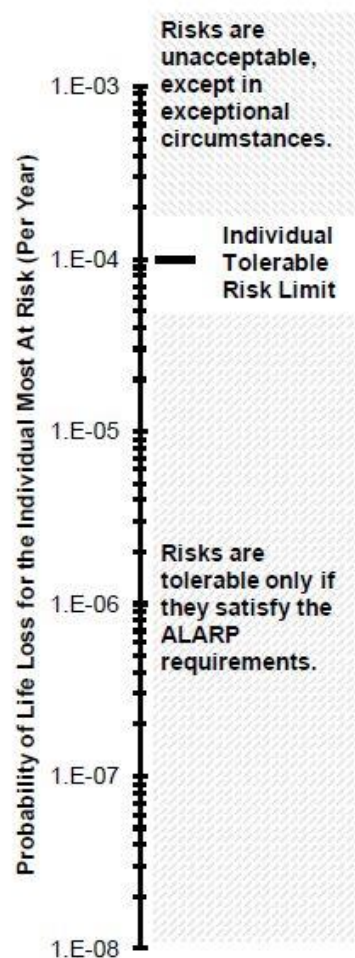


Figura 3.6 - Critérios de risco de tolerabilidade do risco individual propostos pelo USACE (2012)

3.2.2 Risco societal

O conceito de risco societal é definido como um risco que, quando concretizado, assume consequências de grande escala e/ou abrangência que implicam uma resposta do meio social e político (HSE, 1995 *apud* Pimenta, 2008).

Tal como no risco individual, também existe a necessidade de estabelecer limites de aceitabilidade e tolerabilidade para o risco societal. Neste sentido, certas entidades de diferentes países desenvolveram gráficos e diagramas que, de forma relativamente simples, ajudam na tomada de decisão quanto à aceitabilidade e tolerabilidade do risco. Pode-se destacar o *Australian National Committee On Large Dams* (ANCOLD), o *New South Wales Dams Safety Committee* (NSW DSC), o *NSW Department of Planning* (NSW DOP), o *US Bureau of Reclamation* (USBR) que desenvolveram, para os seus países, gráficos de apoio à análise da aceitabilidade do risco. Segundo ICOLD (2005), é expectável que a apreciação de riscos varie de país para país uma vez que, no processo de decisão, entram valores relativos à sociedade, regulamentos, leis, donos, entre

outros. No entanto, os critérios de risco societal mais divulgados no âmbito das barragens são os utilizados pela ANCOLD.

Os primeiros critérios publicados pela ANCOLD (2003) remontam ao ano 1994, tendo sofrido a primeira revisão em 1998, e uma segunda em 2003, sendo estes os critérios em vigor presentemente (Figura 3.7).

Tal como no caso da Figura 3.7, o risco societal é, geralmente, representado por curvas FN em gráficos bi-logarítmicos, sendo as ordenadas, F, a probabilidade anual de um acidente com um número de fatalidade igual a superior a N, em abcissas, representando o número de fatalidades.

Assim como no risco individual, existem três regiões distintas no gráfico de critérios da ANCOLD (*op.cit.*):

- Risco inaceitável: região cujo risco é intolerável, exceto em circunstâncias excecionais;
- Risco tolerável: região de risco é tolerável somente se o princípio ALARP for respeitado;
- Risco aceitável: região de risco insignificante, no entanto o princípio ALARP tem que ser respeitado.

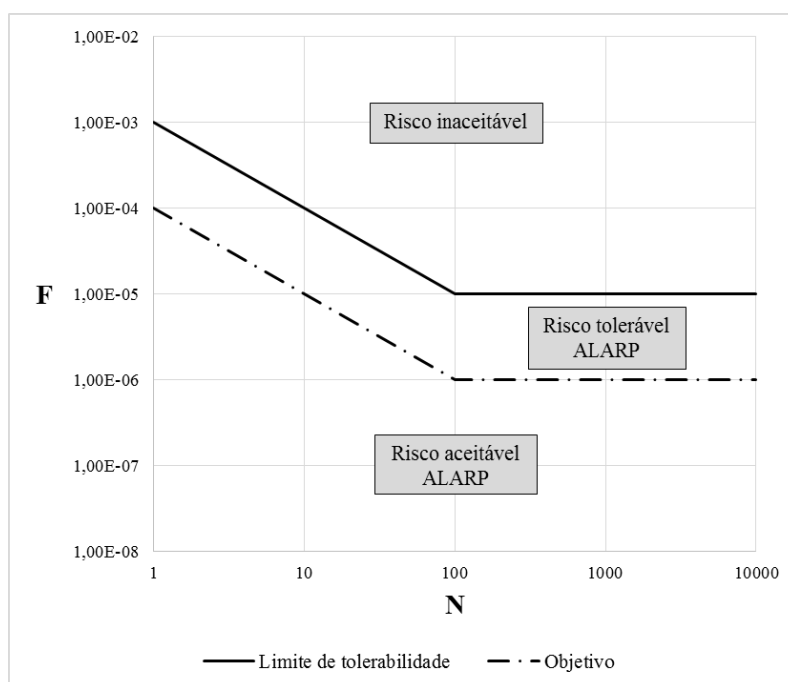


Figura 3.7 - Critérios de risco da ANCOLD (2003)

Nas Figuras 3.8 e 3.9 expõem-se os critérios de risco societal propostos pela USBR (2011) e USACE (2012), respetivamente. Os critérios divulgados pelas duas entidades apresentam algumas diferenças, começando pelo tipo de gráfico utilizado. A USACE utiliza as habituais curvas FN, sendo que o USBR usa curvas fN para representação societal do risco.

Na apresentação na forma fN, f representa a probabilidade anual de um acontecimento com o número de fatalidades N, sendo que um gráfico fN retrata tanto o risco societal como o individual.

A grande diferença entre estes dois tipos de representação é o facto de as curvas fN retratarem o número de fatalidades para cada modo de rotura e as curvas FN retratarem o número de fatalidades associado ao risco cumulativo de todos os modos de rotura.

Para além da diferença no tipo de curva utilizada para representação do risco societal, estes dois gráficos diferem na terminologia utilizada. Os critérios fornecidos pelo USBR são vistos como diretrizes, utilizando termos como – aumento ou diminuição da justificação para diminuição do risco - e enfatizam a proteção pública em vez da tolerabilidade do risco. Por outro lado a USACE utiliza a terminologia, utilizada tanto pelo ANCOLD como pelo HSE (tolerável e inaceitável), com uma conotação regulamentar.

No entanto, ambas as Figuras (3.8 e 3.9) destacam a região, limitada superiormente pelo valor de $f/F 10^{-6}$ e à esquerda pelo valor de 1000 vidas – baixa probabilidade/consequências elevadas, referindo a necessidade de um cuidada apreciação dos riscos e benefícios em causa e um esforço adicional para a redução desses riscos, bem como a utilização do princípio ALARP na tomada de decisões (USACE, 2012).

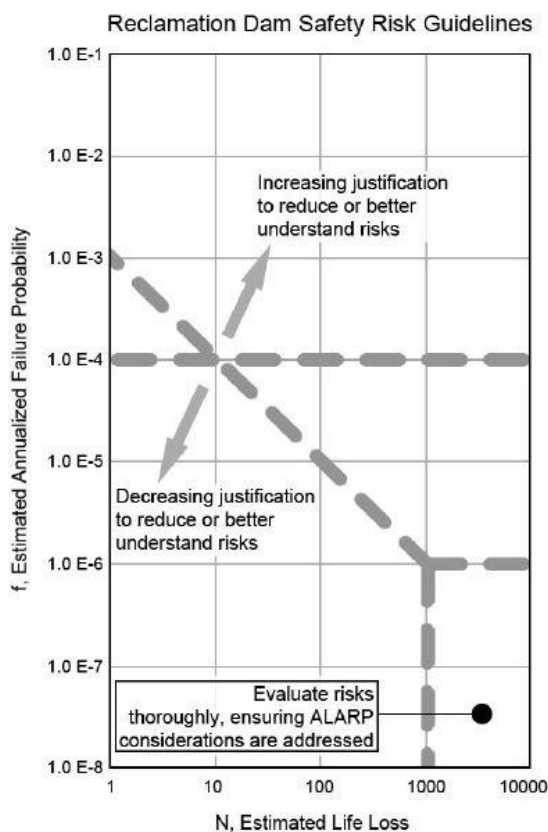


Figura 3.8 - Critérios de risco societal do USBR (USBR, 2011)

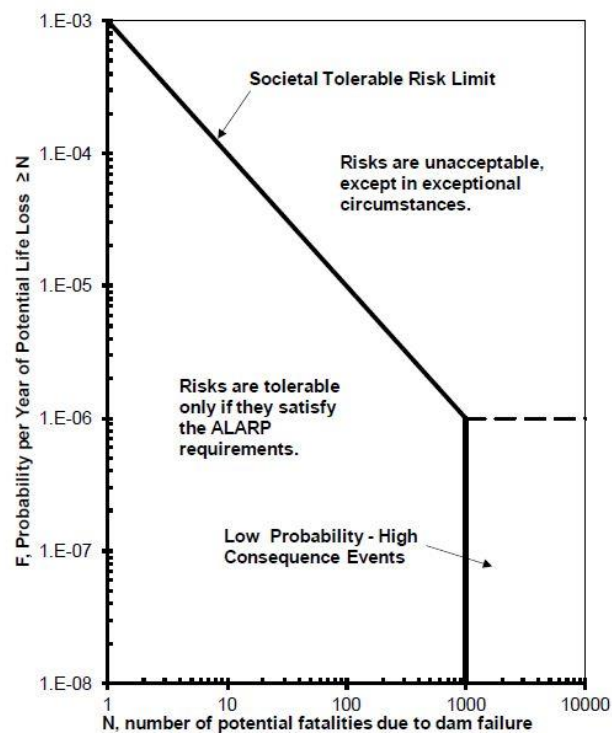
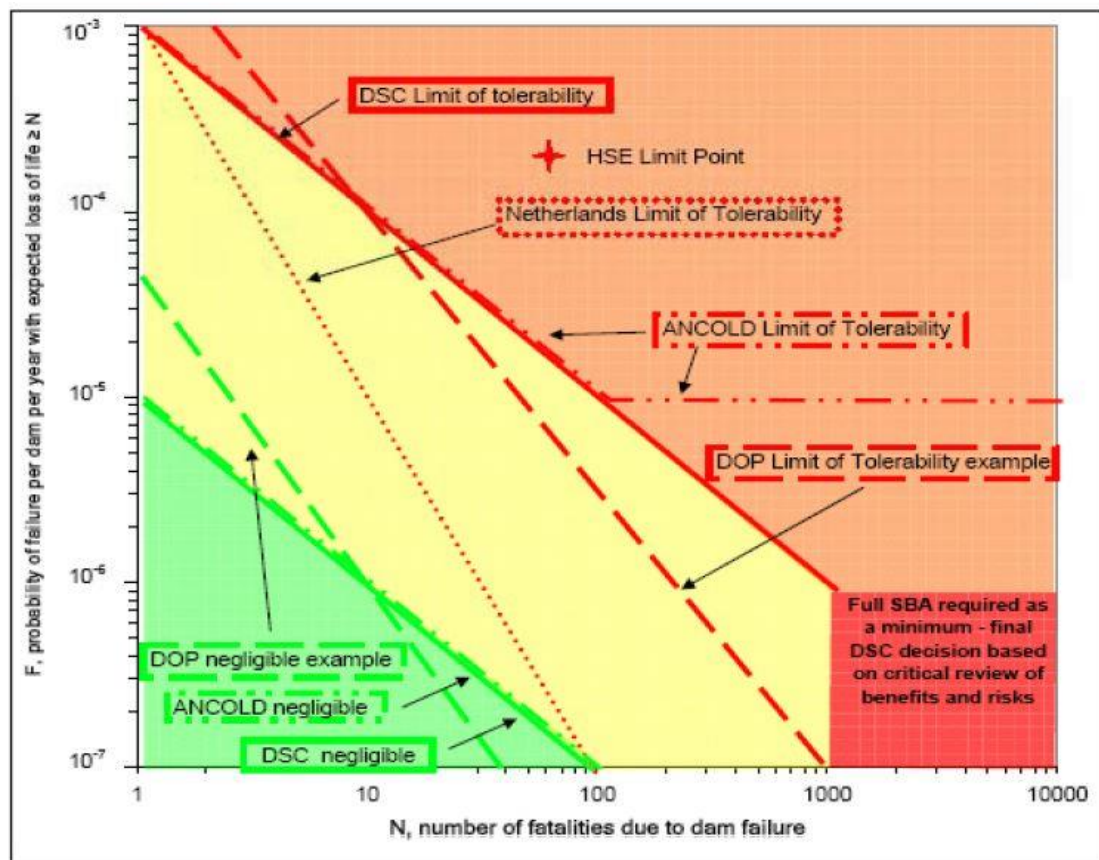


Figura 3.9 - Critérios de risco societal do USACE (USACE, 2012)

A título de exemplo na Figura 3.10 apresentam-se os critérios de risco societal propostos pela DSC, DOP, Holanda e ANCOLD, referentes aos critérios iniciais de 1994 (McDonald, 2007).



Legenda: SBA – standards-based approach

Figura 3.10 Critérios de risco societal do DSC, Holanda, ANCOLD e DOP (McDonald, 2007).

Observando todos os critérios apresentados, pode-se afirmar que existe uma grande preocupação em manter acontecimentos com potenciais perdas superiores a 100 e probabilidades maiores que 10^{-5} na região intolerável e nos casos mais conservativos na região tolerável.

Através dos resultados obtidos nas fases anteriores do processo de gestão de risco, é então possível realizar a apreciação de riscos. A sua abordagem difere consoante o tipo de análise de risco desenvolvida (quantitativa, semi-quantitativa ou qualitativa).

Os critérios demonstrados do tipo FN e fN inserem-se no âmbito de análises de risco quantitativas sendo que, para as análises qualitativas e semi-quantitativas, existem em desenvolvimento variantes deste tipo de representações, tratando-se geralmente de matrizes de riscos que classificam a probabilidade de ocorrência da rotura e respetivas consequências através de escalas numéricas ou descritivas (Pimenta, 2008).

A título de exemplo, e uma vez que as classificações serão aplicadas no caso de estudo na secção 5, com as devidas adaptações, apresentam-se, nas Tabela 3.9 e 3.10, as classes que definem a verosimilhança e severidade das consequências segundo Robertson (2003). Estas classificações são utilizadas em apreciações de risco semi-quantitativas e qualitativas.

Classe de verosimilhança	Verosimilhança para a ocorrência de consequências de segurança (eventos por ano)	Verosimilhança para a ocorrência de consequências de interesse ambiental e público (eventos por ano)
Não é provável	< 0,01% hipótese de ocorrência	< 0,1% hipótese de ocorrência
Baixa	0,01 – 0,1% hipótese de ocorrência	0,1 – 1% hipótese de ocorrência
Moderada	0,1 – 1% hipótese de ocorrência	1 – 10% hipótese de ocorrência
Alta	1 – 10% hipótese de ocorrência	10 – 50% hipótese de ocorrência
Expectável	> 10% hipótese de ocorrência	> 50% hipótese de ocorrência

Tabela 3.10 – Classes de verosimilhança do risco (adaptado Robertson, et al., 2003)

A sua aplicação, apesar de simples e expedita, depende bastante das capacidades do analisador e do conhecimento adquirido sobre o sistema em análise, sendo normal existir um certo grau de subjetividade inerente a este processo.

A Tabela 3.9 representa as classes de verosimilhança, tendo sido consideradas por Robertson *et al.* (2003) duas distribuições de verosimilhança: para consequências de segurança e para consequências de interesse ambiental e público.

Quanto às consequências o autor considera a classificação da sua severidade para quatro áreas distintas (Tabela 3.10):

- Impactes biológicos/ambientais;
- Impactos regulamentares;
- Interesse público e credibilidade;
- Saúde e segurança.

Tabela 3.11 - Classes de severidade das consequências do risco (adaptado Robertson, et al., 2003)

Severidade das consequências	Impactes biológicos/ Ambientais	Impactos regulamentares	Interesse público e credibilidade	Saúde e segurança
Extremo (> \$10M)	Impacte catastrófico (significativo e irreversível)	Incapaz de respeitar obrigações regulamentares; suspensão ou restrição rigorosa das operações	Protestos e manifestações locais, internacionais e das ONGs, resultam na desvalorização do capital; grandes pagamentos compensatórios	Fatalidade ou múltiplas fatalidades expectáveis
Alto (\$1 – \$10M)	Impacte significativo e irreversível ou significativo e reversível	Incumprimento regular (mais de uma vez por ano) das obrigações ou expetativas regulamentares	Ativismo local, internacional ou das ONGs resulta em impactos políticos e financeiros, e em grandes alterações nos procedimentos	Feridos graves ou possibilidade de incapacidade física; ou eventuais fatalidades
Moderado (\$0,1 – \$1M)	Impacte significativo e reversível	Incumprimento ocasional (menos de uma vez por ano) das obrigações ou expetativas regulamentares	Atenção local, internacional e das ONGs ocasional que requer pequenas alterações no procedimento	Potenciais feridos; ou potenciais feridos grave; ou probabilidade muito reduzida de fatalidades
Baixo (\$0,01 – \$0,1M)	Impacte baixo	Obrigações ou expetativas regulamentares são raramente ou marginalmente superadas	Atenção local, internacional e das ONGs pouco frequente	Feridos ligeiros; ou probabilidade muito reduzida de feridos graves
Insignificante (< \$0,01M)	Impacte insignificante	Não excede obrigações e expetativas regulamentares	Atenção local, internacional e das ONGs inexistente	Impacte insignificante

3.3 CONTROLO DE RISCOS

A análise de risco fornece uma estrutura para capturar o conhecimento e julgamento dos profissionais de engenharia de barragens sob a forma de estimativas de risco, enquanto a apreciação de risco fornece uma perspectiva sobre o significado do risco estimado com base em critérios ou orientações fornecidas (ICOLD, 2005). Cabe então à fase de controlo de riscos decidir quanto à prevenção, mitigação e deteção de acontecimentos que possam provocar efeitos e consequências indesejáveis.

Segundo a CNPGB (2005), esta etapa contempla a implementação de medidas para manter ou reduzir o risco e a reavaliação periódica da sua eficácia.

Nesta linha de pensamento o controlo de risco pode ser composto por sete atividades (Pimenta, 2008; Veiga Pinto, 2008): decisão; mitigação; prevenção; deteção; plano de emergência; revisão; comunicação dos riscos. Estas encontram-se sintetizadas em seguidamente.

a) Decisão

Segundo Pimenta (2008) “a tomada de decisão fundamenta-se, numa primeira análise, na comparação entre a estimativa de riscos (resultado da análise de riscos) e os critérios de aceitabilidade e tolerabilidade de riscos (apreciação de riscos) ”.

Existem diversas técnicas de apoio à decisão que podem ser aplicadas de forma a garantir o respeito de todas as restrições e interesses inerentes a um projeto de uma barragem de rejeitados. No entanto, o essencial desta fase prende-se, nos casos em que é necessária redução do risco, com a avaliação do binómio custo-benefício das medidas de redução de risco, correspondendo na prática ao custo inerente à redução do risco, com o objetivo de evitar fatalidades (Faber, 2001).

b) Redução do risco

As medidas de redução de risco podem ser de natureza estrutural ou não, e dependem do tipo de implementação – longo prazo ou curto prazo, e podem, principalmente, atuar na prevenção ou mitigação do risco.

A redução do risco através de medidas preventivas opera na redução da probabilidade da ocorrência de um modo de rotura ou efeito final. Como formas de prevenção podem ser utilizadas, a título de exemplo, medidas como:

- Impermeabilização da fundação da barragem – medida estrutural;
- Limitação do NAA – medida não estrutural, através da suspensão da deposição de rejeitados na albufeira;

- Subida da cota do coroamento – medida estrutural;
- Colocação de sacos de serradura para obviar o escoamento pelo evacuador de cheias numa barragem de rejeitados – medida não estrutural.

A mitigação do risco define técnicas e princípios de gestão, que tem como objetivo, reduzir as consequências de um evento indesejado, sendo que devido à diversidade da natureza do risco, estas medidas podem, também, ser estruturais ou não estruturais. A título de exemplo consideram-se como medidas de mitigação:

- Realojamento da população e indústrias (medida não estrutural);
- Reparações estruturais, *e.g.*, do núcleo, de zonas deterioradas (taludes), construção de bermas estabilizadoras, entre outras;

c) Detecção

A deteção abrange, usualmente, duas categorias de atividades distintas: a inspeção e instrumentação, cujo principal objetivo passa por preservar a segurança da barragem.

No caso da inspeção é exigida a caracterização dos seus objetivos – tipos de inspeção, periodicidade para as diferentes fases da obra, equipas de inspeção e as técnicas de realização utilizadas (Pimenta, 2008). Quanto à instrumentação é necessária a especificação dos equipamentos a instalar (número e localização), as condições de instalação e exploração, bem como a periodicidade das leituras para as diferentes fases de vida da obra (*op.cit.*).

Em Portugal, existem normas que regulamentam a forma como é efetuada a inspeção e a instrumentação de uma barragem. As normas de observação e inspeção de barragens, fornecidas pelo RSB (1993), têm por objeto “os princípios e critérios que devem presidir à execução dessas actividades e os métodos de garantia de qualidade que lhes devem ser aplicados”.

As NOIB definem, para a fase de projeto, os objetivos do plano de observação, bem como aspetos relativos à sua elaboração, constituição, revisão e adaptação (RSB, 1993). Neste capítulo da norma encontram-se definidos aspetos relativos a:

- Inspeções visuais;
- Sistema de monitorização (inclui instrumentação);
- Repartição de tarefas;
- Frequência de leituras;
- Recolha e processamento de dados;
- Procedimento e esquema de comunicação em caso de comportamento anómalo;
- Relatório da instalação e exploração do sistema de observação;

- Qualificações dos agentes encarregados da instalação e exploração do sistema de observação;
- Análise do comportamento e avaliação da segurança.

d) Plano de emergência

Segundo a CNPGB (2005), o plano de emergência corresponde ao documento que contém os procedimentos a adotar em situações de emergência, os esquemas de comunicação e os mapas de inundação, existindo indicações dos níveis de água atingidos, a montante e jusante, e os tempos de chegada da onda de inundação. O plano de emergência é geralmente constituído pelo plano de emergência interno (PEI) e externo (PEE).

O PEI tem como objetivo garantir a segurança da barragem e do vale de jusante na zona de auto-salvamento – distância ao local da chegada da cheia induzida pelo acidente em meia hora, com o mínimo de 5 km; sendo esta da responsabilidade do dono de obra (Veiga Pinto, 2008). No que diz respeito ao PEE, da responsabilidade do sistema de proteção civil, deve garantir a segurança de todo o vale jusante, para além da zona de auto-salvamento (op.cit.).

Esta divisão é reconhecida, e seguida, pelos principais organismos que desenvolvem atividade em segurança de barragens, a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) e o Instituto da Água (INAG) (Viseu & Almeida, 2011).

e) Revisão

Naturalmente, com o avançar do tempo, existe a possibilidade de alteração de certas condicionantes do sistema que podem levar à alteração da probabilidade ou consequência de certos riscos, sendo então óbvia a necessidade de uma constante revisão destas componentes e, se necessário, o procedimento da sua retificação. Deve, no entanto, estabelecer-se a periodicidade com que estas revisões são executadas, o seu objetivo e as respetivas especificações.

f) Comunicação

Apesar de ser um elemento aparentemente simples, a comunicação dos riscos e a transmissão da informação necessária para a segurança da população em risco, pode apresentar certas condicionantes que podem complicar este processo. Neste contexto, a forma e a temporalidade como é realizada a comunicação dos riscos deve ser analisada adequadamente, de forma a existir uma melhor reação e postura perante o risco.

Importa também realçar a necessidade de uma comunicação adequada entre as diversas entidades envolvidas na gestão de risco de uma barragem, especialmente em situações de rotura, onde as medidas de emergência requerem uma rápida e eficaz reação aos acontecimentos indesejados.

Na perspectiva de gestão, apesar das muitas semelhanças com as atividades anteriormente referidas, as opções do controlo de risco podem ser agrupadas nas seguintes categorias, reforçando no entanto a ideia de que apenas se tratam de traços gerais de apoio à decisão e não de regras restritas (ICOLD, 2005; AGS, 2000):

- **Aceitar o risco:** Normalmente requer que o risco tenha sido considerado aceitável ou tolerável;
- **Evitar o risco:** Exige, ou uma decisão antes do início da construção da barragem de forma a eliminar o risco, ou abandono do projeto ou, em casos extremos de barragens existentes, ao respetivo desmantelamento;
- **Reduzir probabilidades:** Requer aplicação de medidas estruturais (*e.g.*, instalação de drenos), de aplicação de um plano de monitorização e inspeção, etc. de forma a tornar o risco aceitável ou tolerável;
- **Reduzir consequências:** Requer plano de emergência eficiente, ou recolocação da PAR, entre outras. de forma a tornar o risco aceitável ou tolerável;
- **Transferir o risco:** Requer a aceitação do risco por outra autoridade, ou a compensação do risco através de um seguro;
- **Aceitação:** Os riscos são aceites quando a análise custo/benefício é positiva e estes são considerados aceitáveis ou toleráveis, dependendo das circunstâncias.

O controlo de riscos encerra o conjunto de atividades compreendidas na gestão de risco e, tal como na apreciação de riscos, o processo de decisão nesta etapa irá variar consoante o país, organização, entidade, etc. Assim, as orientações expostas neste capítulo não passam de linhas gerais de suporte à decisão que devem ser adequadas em conformidade com as exigências do projeto em apreço.

4 CASO DE ESTUDO HIPOTÉTICO

Neste capítulo apresenta-se a aplicação de uma gestão de riscos a uma infraestrutura de armazenamento de rejeitados, durante a fase de projeto. Face à natureza desta dissertação, e uma vez que a aplicação completa de uma gestão de risco sairia do âmbito deste trabalho, optou-se por aprofundar a fase de avaliação de riscos, abrangendo a análise e a apreciação de riscos.

Uma vez que a aplicação de uma metodologia de gestão de riscos a um caso de estudo real não seria possível em tempo útil, optou-se pela aplicação a um caso de estudo hipotético de uma barragem de aterro de retenção de rejeitados, com as devidas adaptações necessárias.

4.1 PROPOSTA DE METODOLOGIA

De forma a garantir uma adequada gestão de riscos para o caso em apreço, foi proposta a metodologia apresentada na Figura 4.1, dando especial destaque à Etapa 2, referente à avaliação de riscos.

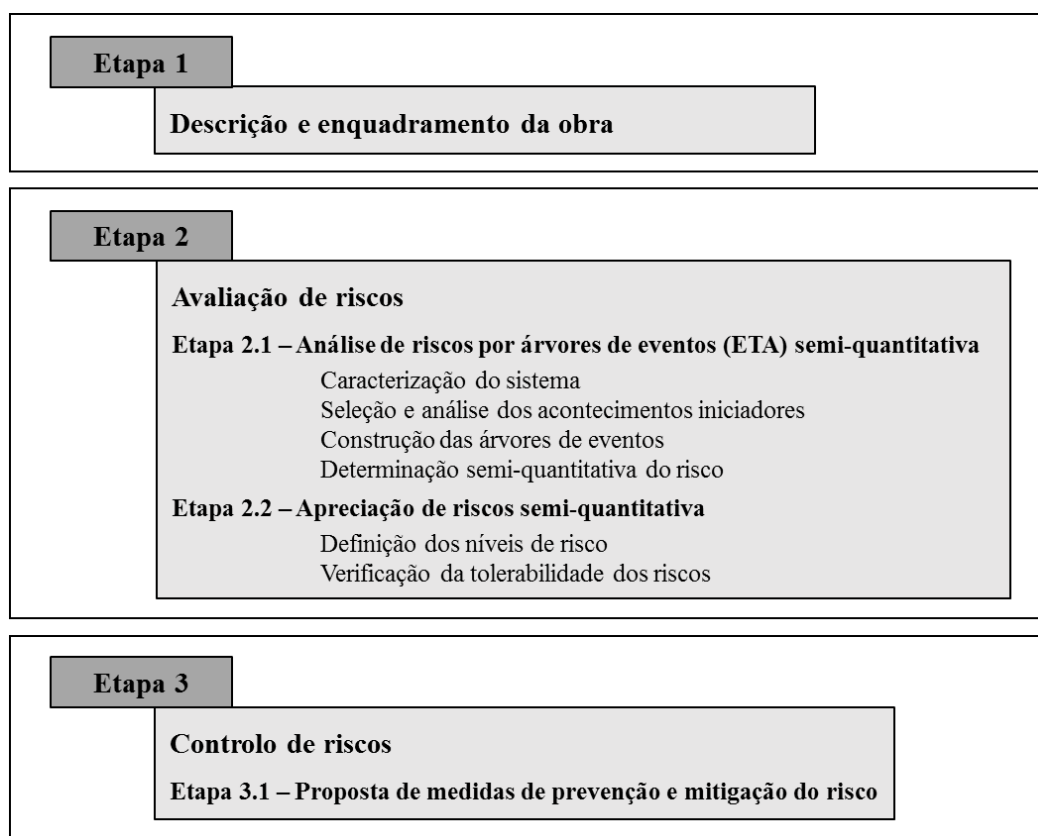


Figura 4.1 - Metodologia de gestão de riscos proposta para o caso de estudo

As três etapas presentes na metodologia adotada e as suas principais características são as seguintes:

Etapas 1 – Descrição e enquadramento da obra: Nesta etapa será realizada a contextualização do caso de estudo, através de uma síntese da informação recolhida, indicando os aspetos fundamentais que a caracterizam, bem como, as características geológicas regionais e trabalhos de prospeção realizados, que culminam num zonamento geológico e plano de instrumentação.

Etapas 2 – Avaliação de riscos: A avaliação de riscos divide-se em duas etapas:

- Análise de riscos por árvore de eventos (ETA) semi-quantitativa: Num estágio inicial será efetuada a caracterização do sistema da barragem, na qual são incluídos a estruturação do sistema e a descrição das funcionalidades dos vários componentes. Seguidamente, realiza-se a seleção dos acontecimentos iniciadores, organizando-os por categorias e por componentes onde ocorrem, sendo construídas e analisadas as árvores de eventos para cada acontecimento iniciador. Por último, é realizada a classificação dos riscos com base na verosimilhança e severidade das consequências de cada acontecimento iniciador e respetivos modos de rotura.
- Apreciação de riscos: Depois da atribuição das classes de risco, é necessário o estabelecimento de limites para os valores do risco. Estabelecidos esses limites, devem definir-se as atividades e prioridades para o tratamento dos riscos dentro dos intervalos de valores de risco definidos.

Etapas 3 – Controlo de riscos: Nesta etapa serão propostas medidas de deteção, prevenção e mitigação dos riscos considerados significativos e intoleráveis, com o intuito de os reduzir para níveis de risco toleráveis ou, preferencialmente, para níveis de risco aceitáveis.

De modo a evitar a dispersão da atenção relativamente ao principal propósito desta dissertação e ser possível finalizá-la em tempo útil, foram realizadas as seguintes simplificações na aplicação da metodologia:

- Apenas foi realizada a análise relativamente ao corpo principal da infraestrutura de aterro;
- A análise foi executada apenas para condições estáticas, não tendo sido considerada a ocorrência de um evento sísmico;
- Não foram tidos em conta efeitos de eventos cumulativos – *e.g.*, no caso de um deslizamento do talude de montante, se o NAA estiver relativamente elevado, pode dar origem ao galgamento do coroamento, causado pela onda originada pelo deslizamento.

4.2 DESCRIÇÃO E ENQUADRAMENTO DA BARRAGEM EM ESTUDO

Neste capítulo será efetuada a descrição da barragem em estudo, bem como a apresentação de uma síntese da informação recolhida para a realização da gestão de riscos.

A infraestrutura em estudo destina-se à retenção de rejeitados originários do processamento de minérios de sulfuretos, algures no Alentejo, Portugal. Trata-se de uma barragem de aterro zonada, com 50 m de altura e 600 m de coroamento, e com o eixo orientado a N 85° E (Tabela 6.1).

Tabela 4.1 - Características gerais da infraestrutura

Localização	Alentejo (Portugal) – Faixa Piritosa Ibérica		
Tipo de exploração mineira	Sulfuretos		
Data de início da deposição de rejeitados	2017		
Estado da exploração	Projeto		
Características de exploração	Comprimento do coroamento	600m	
	Cota do coroamento	177m	
	Largura do coroamento	9m	
	Cota nível de pleno armazenamento	175,25m	Folga = 1,75m
	Cota nível de pleno armazenamento de resíduos (NPAR)	175m	Folga = 2m
	Cota nível máximo de cheia (NMC)	176m	Folga = 1m
	Cota nível mínimo de exploração (nme)	154m	Folga = 23m
	Volume (no NPAR)	75x10 ⁵ m ³	
	Superfície inundada (no NPAR)	6,04x10 ⁵ m ²	

Da exploração e processamento dos sulfuretos polimetálicos podem ser expetáveis os seguintes subprodutos, que serão armazenados na albufeira da barragem:

- Rejeitados geradores de ácidos resultantes da transformação de sulfuretos, provenientes do processamento do minério efetuado nas lavarias, e que constituem cerca de 99% dos resíduos a depositar;
- Lamas e outros resíduos de perfuração contendo outras substâncias perigosas, provenientes das operações de furação;
- Outros resíduos contendo substâncias perigosas resultantes da transformação físico-química de minérios metálicos;
- Lamas de tratamento de águas residuais urbanas e industriais contaminadas que não podem ser depositadas nos aterros sanitários.

A estrutura da barragem será composta por um núcleo inclinado, argilo-siltoso, proveniente da alteração do xisto do Paleozoico, existente na envolvente ao eixo, cujos elementos apresentam granulometria inferior a 60mm e com permeabilidade na ordem de k menor ou igual a 10^{-8} m/s. Adicionalmente, o núcleo possuirá uma percentagem de finos inferior a 15%, de forma a evitar uma possível liquefação dos materiais constituintes.

O talude de montante está projetado de forma a garantir uma inclinação de 1(V):2,5(H), encontrando-se protegido por uma camada de enrocamento de diâmetro médio, D_{50} de 0,25m, com 0,5m de espessura, sendo esta assente sobre uma camada de brita com 0,3m de espessura, que por sua vez está assente sobre um geotêxtil, com a função de separação e filtragem.

O talude de jusante, com inclinação de 1(V):2,2(H), será revestido por uma camada vegetal (gramíneas), exceto na saída do tapete drenante que será protegido por elementos grosseiros. Ainda no talude de jusante, como medida de drenagem superficial, serão instaladas três banquetas. Ambos os maciços estabilizadores serão constituídos por xisto alterado e fraturado.

Como dispositivos de drenagem e filtragem, será instalado um filtro sub-vertical, paralelo e a jusante do núcleo, com 2m de espessura, que se estenderá até a um tapete drenante. O tapete drenante será construído na base do maciço estabilizador de jusante (cobrindo toda a fundação e encontros), com o objetivo de conduzir as águas infiltradas até aos poços de drenagem, alojados a jusante, que por sua vez irão encaminhar a água captada de volta à albufeira através de bombagem. Ainda com a função de filtro e separação, será instalado um geotêxtil sobre o filtro sub-vertical e sob o maciço estabilizador de jusante (Figura 4.2).

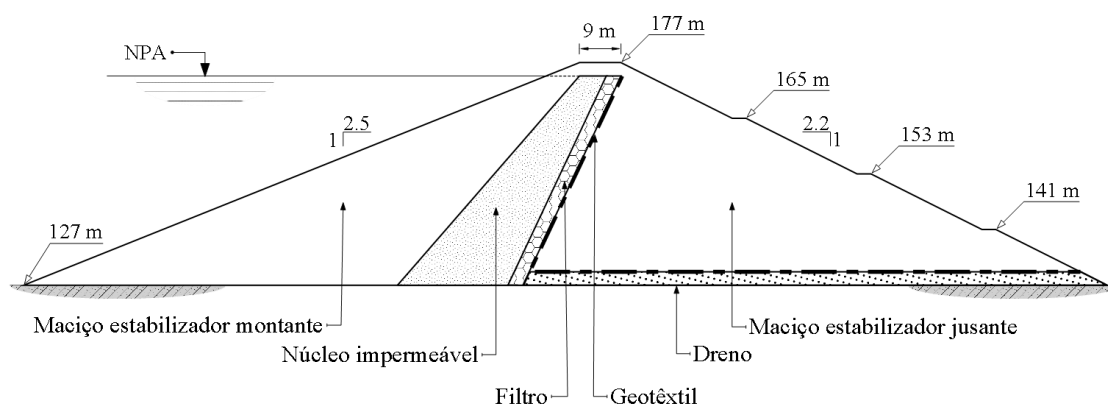


Figura 4.2 - Esquema do perfil transversal da barragem

Relativamente aos órgãos de segurança, o projeto inclui um descarregador de superfície que funcionará apenas em casos de emergência, sendo dimensionado para uma cheia de período de retorno de 5 000 anos e um período de retorno para o vento de 100 anos (em consonância com o RSB, 1993). Este evacuador, sem comportas ou outros equipamentos hidromecânicos, não está, portanto, sujeito às eventuais avarias que são comuns em estruturas de conceção diferente. Salienta-se que, neste processo de descarga, não existe intervenção humana.

Uma vez que o termo NPA representa, para uma barragem de água convencional, o nível máximo de armazenamento de uma barragem garantindo a segurança da mesma e a cota a partir da qual o descarregador de superfície entra em funcionamento, numa barragem deste tipo a chegada no NAA a esta cota deve ser evitada, desta forma é introduzido o termo NPAR (nível de pleno

armazenamento de resíduos), o qual representa a cota do nível de resíduos máximo que podem ser armazenados garantindo a segurança da barragem e dos terrenos a jusante.

4.2.1 Características geológicas regionais

Nesta secção expõem-se os aspetos associados à região em que o caso em apreço se insere, incluindo: litoestratigrafia, tectónica e geomorfologia; hidrogeologia; e sismicidade.

4.2.1.1 Litoestratigrafia, tectónica e geomorfologia

A zona de construção da barragem está inserida numa formação turbidítica de idade carbónica, designada por *Flysh*. Esta formação é composta por camadas de xistos e grauvaques, com raras alternâncias de conglomerados, sedimentados durante o Viséano superior.

Os grauvaques apresentam granulométrica média e são mal calibrados, exibindo fragmentos de rocha aflorantes ao longo da bacia de sedimentação do *Flysh*. No que diz respeito aos xistos, estes apresentam-se ligeiramente silteosos e carbonosos. Sobre a formação turbidítica encontram-se depósitos recentes de sedimentos aluvionares e eluvio-coluvionares.

A tectónica da região aparenta ter sido fortemente afetada pela orogenia hercínica, que produziu dobramentos, cavalgamentos, fraturação e clivagem. As principais dobras exibem, geralmente, orientação WNW a NNW com inclinação para NE (com inclinação maior que 60°) e são consideradas abertas. No que toca à fraturação, existe alguma variação quanto à sua direção ao longo da fundação da barragem, tendo sido destacadas quatro famílias de diaclases – Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Famílias de diaclases identificadas junto ao eixo do aterro

Família 1	N 50° E, 80°S a 70°N	Família 3	N 25° W, 70°NE
Família 2	N 70° W, 70°S a 80°N	Família 4	N10°W, 70°E a 80°W

As falhas, tardi-hercínicas, apresentam alguns deslocamentos importantes e são maioritariamente orientadas a NE. A principal falha da região, designada por falha da Messejana ou Odemira-Ávila, de idade pós-hercínica, motivou a formação de fraturas irregulares que posteriormente foram preenchidas por doleritos. Na zona de influência do eixo da barragem existe uma falha, na margem esquerda, com atitude N-S com inclinação 45°E.

A região de implementação da barragem apresenta revelo suave e rede de drenagem desenvolvida aberta dendrítico-retangular, modelada em função da litologia e controlada estruturalmente.

4.2.1.2 Aspetos hidrogeológicos

Como referido na secção anterior, a rede de drenagem existente na região de implementação da barragem é consideravelmente desenvolvida, devido à baixa permeabilidade das formações e à baixa resistência à erosão linear, assumindo então uma forma dendrítica. Existem alguns cursos de água instalados nas zonas mais fracas do maciço, onde a erosão é facilitada (falhas, zonas de

esmagamento). A permeabilidade primária das formações é muito baixa devido à constituição litológica, com exceção de alguns grauvaques grosseiros.

Quanto à infiltração de águas pluviais é efetuada essencialmente pelas discontinuidades (falhas, diaclases) ou por filões e filetes maioritariamente quartzosos e muito fraturados, sendo, portanto, o maciço considerado permeável por fraturação.

No que diz respeito à permeabilidade do maciço rochoso, a percolação é efetuada fundamentalmente através das discontinuidades e zonas tectonicamente perturbadas. Com base na análise dos resultados dos ensaios de absorção de água sob pressão – tipo *Lugeon*, foi considerado que a fundação apresenta uma permeabilidade relativamente baixa ($\leq 10^{-8}$ m/s), não estando prevista a necessidade de trabalhos de impermeabilização da fundação. No entanto, seria necessário um estudo hidrológico mais profundo a fim de determinar a direção e velocidade do fluxo, para ser tomada uma decisão mais consciente das medidas a adotar.

4.2.1.3 Sismicidade

Segundo o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, a região está incluída na zona A, para a qual é atribuído o coeficiente de sismicidade $\alpha_1 = 1,0$, sendo esta a zona de maior risco sísmico das quatro propostas pelo regulamento. Em contrapartida a intensidade sísmica máxima registada na região, segundo a carta de Portugal Continental, foi de grau VI da escala de *Mercalli* modificada.

Para um período de retorno de 1000 anos e para a área em estudo, considera-se a seguinte ordem de grandeza para os valores máximos de parâmetros sísmicos: Aceleração: 130 cm.s⁻²; Velocidade: 13 cm.s⁻¹; Deslocamento: 7 cm.

A falha da Messejana, apesar de ser a principal falha na região, ser considerada ativa e afetar o eixo da barragem, apenas será considerada para análise no que diz respeito à permeabilidade que transmite ao maciço rochoso, uma vez que para esta gestão de riscos serão consideradas condições estáticas.

4.2.2 Trabalhos de prospeção realizados

Os trabalhos de prospeção foram iniciados com um pormenorizado reconhecimento de superfície, seguidos pela escavação de uma vala de prospeção e a execução de 7 perfis sísmicos de refração, ambos ao longo do alinhamento do eixo. Realizaram-se ainda perfis sísmicos de refração a montante do eixo. Para além destes trabalhos, realizaram-se 8 sondagens de rotação com amostragem contínua, acompanhadas pela execução de ensaios de absorção de água sob pressão do tipo *Lugeon*.

4.2.3 Zonamento geotécnico

Os resultados obtidos através da prospeção possibilitaram a delimitação de um zonamento geotécnico do maciço de fundação na zona do eixo em profundidade. Este zonamento consistiu na delimitação de zonas do maciço com comportamentos aproximadamente homogêneos em termos das respetivas características geotécnicas. Neste caso, foi dada especial atenção ao estado de alteração e de fraturação, à velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais e à presença de acidentes tectónicos, tendo sido estabelecidas três zonas distintas cujas características integram a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características das zonas pertencentes ao zonamento geotécnico

Zona geotécnica	Alteração (W)	Fraturação (Fr)	Velocidade das ondas (m.s⁻¹)	Posição relativa e espessura
ZG3	5 a 4-5	5 a 4-5	<1000	Zona superior do maciço. Espessura <2m
ZG2	3	4-5 a 4	1000–2500	Subjacente a ZG3. Espessura > 4m
ZG1	1 a 2	4-5 a 3	>2500	Subjacente a ZG2

4.2.4 Plano de instrumentação

No que diz respeito ao plano de instrumentação, definido com base nas NOIB (1993), está prevista a instalação dos seguintes equipamentos, para além da realização de inspeções visuais de rotina:

- Marcas de nivelamento;
- Pilares fixos;
- Inclínómetros;
- Extensómetros;
- Piezómetros hidráulicos;
- Câmaras para medição de caudais;
- Caudalímetros instalados em cada bomba do sistema de bombagem dos poços.

4.3 AVALIAÇÃO DE RISCOS

Enquadrada na fase de projeto esta análise tem como objetivo primário a avaliação de consequências e o apoio à tomada de decisões. Associada a esta fase, está a possibilidade de retirar resultados mais evidentes de uma análise de riscos, uma vez que existe a possibilidade de alteração de aspetos do projeto em desenvolvimento, que concedem à etapa de controlo de riscos uma relativa flexibilidade, de forma a prevenir e mitigar eventuais riscos devido à fase precoce em que a infraestrutura se encontra.

4.3.1 Análise de riscos por árvore de eventos (ETA)

Particularmente nesta etapa o intuito passa por adquirir um conhecimento pormenorizado do sistema, de forma a identificar e sistematizar os potenciais modos de rotura de cada componente

e destacar acontecimentos iniciadores que requerem maior atenção devido à sua potencialidade de causar danos relevantes e que, consequentemente, permitem atuar de forma preventiva.

Como fase fundamental de uma análise de riscos, e fazendo parte de um dos principais objetivos desta dissertação, a identificação de riscos geotécnicos e geoambientais deve beneficiar de especial atenção. Desta forma, na secção 4.3.1.1, integrada na caracterização do sistema e dos respetivos subsistemas, serão identificados os riscos inerentes ao caso de estudo hipotético.

4.3.1.1 Caracterização do sistema

De forma a garantir uma melhor compreensão da barragem, nesta secção realiza-se a caracterização do sistema e respetivos subsistemas, referindo as funcionalidades gerais de cada componente.

Na Tabela 4.4 apresenta-se o sistema global da estrutura em estudo, estando esta dividida em três sistemas principais: I – Albufeira, II – Barragem e III – Vale jusante. Destes sistemas principais apenas será considerado para a análise de riscos o sistema principal II – Barragem, o qual é subdividido nas suas componentes básicas na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 - Estrutura do sistema do caso de estudo

Sistema principal	Subsistema
I – Albufeira	I.1 - Taludes
	I.2 – Fundo da albufeira
II – Barragem	II.1 – Corpo principal
	II.2 – Fundação
	II.3 – Encontros
	II.4 – Descarregador de cheias
	II.5 – Poços drenantes
III – Vale jusante	-

Tabela 4.5 - Estrutura em pormenor do sistema principal II - Barragem

Subsistema	Componente básica
II.1 – Corpo principal	II.1.1 – Maciço estabilizador de montante (MEM)
	II.1.2 – Maciço estabilizador de jusante (MEJ)
	II.1.3 – Núcleo
	II.1.4 – Filtro
	II.1.5 – Tapete drenante
	II.1.6 - Geotêxtil
	II.1.7 – Camada de proteção do MEM
	II.1.8 – Camada de proteção do MEJ
II.2 – Fundação	II.2.1 – Zona imediatamente abaixo do corpo principal
II.3 – Encontros	II.3.1 – Zona de contacto da barragem com o encontro esquerdo
	II.3.2 – Zona de contacto da barragem com o encontro direito
II.4 – Descarregador de cheias	II.4.1 – Estrutura global
II.5 – Poços drenantes	II.5.1 - Poços
	II.5.2 – Sistema de bombagem

Relativamente às funcionalidades, a Tabela 4.6 apresenta as funções básicas de cada componente, mantendo os respetivos códigos de identificação apresentados na Tabela 4.4. As zonas de contacto do núcleo, filtro e tapete drenante, não foram contabilizadas na tabela de funcionalidades, uma vez que a sua função básica é idêntica à do núcleo, filtro e tapete drenante, respetivamente.

De seguida é efetuada a descrição dos sistemas principais; no entanto, uma vez que apenas se analisa o sistema principal II – Barragem, esta caracterização aborda os subsistemas, componentes básicas e funcionalidades inerentes ao mesmo.

Dividido em cinco subsistemas, o sistema principal II – barragem, é composto pelo corpo principal (II.1), a fundação (II.2), os encontros (II.3), o descarregador de cheias (II.4) e os poços drenantes (II.5).

Tabela 4.6 - Funcionalidades das componentes básicas do sistema principal II – Barragem

Subsistema	Componente básica	Funcionalidade
II.1	II.1.1 – MEM	Conferir estabilidade mecânica
	II.1.2 – MEJ	Conferir estabilidade mecânica
	II.1.3 – Núcleo	Reduzir a carga hidráulica no MEJ
	II.1.4 – Filtro	Prevenir a erosão do núcleo e a passagem de materiais finos para o tapete drenante e MEJ
	II.1.5 – Tapete drenante	Captar e conduzir a água que atravessa o corpo da barragem e a fundação até aos poços drenantes
	II.1.6 - Geotêxtil	Prevenir a erosão do núcleo e a passagem de materiais finos para o MEJ
	II.1.7 – Camada de proteção do MEM	Proteger o MEM contra a erosão
	II.1.8 – Camada de proteção do MEJ	Proteger o MEJ contra a erosão
II.2	II.2.1 – Zona imediatamente sob o corpo principal	Garantir o suporte do corpo da barragem, reter a água na albufeira e prevenir a contaminação a jusante
II.3	II.3.1 – Zona de contacto da barragem com o encontro esquerdo	Conferir estabilidade mecânica ao aterro, reter a água na albufeira
	II.3.2 - Zona de contacto da barragem com o encontro direito	Conferir estabilidade mecânica ao aterro, reter a água na albufeira
II.4	II.4.1 – Estrutura global	Garantir o descarregamento de água em condições atípicas de modo a evitar um possível galgamento
II.5	II.5.1 - Poços	Recolher a água que atravessa o corpo da barragem e fundação
	II.5.2 – Sistema de bombagem	Bombear para a albufeira a água recolhida pelos poços

A conferir a estabilidade mecânica ao corpo principal (II.1), necessária para suportar os rejeitados armazenados na albufeira, temos o maciço estabilizador de montante (II.1.1) e o maciço estabilizador de jusante (II.1.2). Apesar de possuírem a mesma função é necessária a distinção entre os dois, uma vez que as causas iniciadoras de possíveis modos de rotura têm diferentes

origens e, por conseguinte, diferentes consequências, influenciando de forma distinta os vários subsistemas e sistemas que compõem a estrutura.

Um dos principais problemas associados a estas duas componentes, tanto no MEM como no MEJ, está relacionado com a deficiente compactação dos aterros que pode levar à perda de funcionalidade por deformabilidade excessiva e, num futuro próximo, pode trazer ainda mais problemas na altura em que forem executados os sucessivos alteamentos. No entanto, uma vez que a barragem ainda se encontra em fase de projeto, a deficiente compactação dos aterros apenas ocorrerá se houver uma falha técnica na construção ou uma falha no controlo de qualidade da construção.

Existe ainda a necessidade de fazer referência ao modo de rotura por galgamento, que representa um risco com consequências graves. A inexistência de um descarregador de fundo, consequente do funcionamento em regime de descarga nula desta infraestrutura, pode enfatizar este tipo de rotura; no entanto, a probabilidade de ocorrência é baixa, devido à principal afluência de água à albufeira advir da precipitação. É importante referir que, apesar de a barragem possuir um descarregador de superfície, o seu eventual funcionamento constitui, por si só, um incidente pois irá causar contaminações e impactes diversos a jusante.

As componentes núcleo (II.1.3), filtro (II.1.4), tapete drenante (II.1.5) e geotêxtil (II.1.6) fazem parte do sistema de filtragem e drenagem do aterro, tendo como principais funções prevenir o arraste de finos provenientes do núcleo, bem como captar a água que atravessa toda a estrutura de modo a esta não causar contaminações a jusante. Tal como as componentes anteriores, estas também apresentam alguns problemas, sendo de destacar a perda de funcionalidade causada pelo arraste de finos. Inerente ao núcleo existe o problema comum aos MEM e MEJ, a deficiente compactação, que poderá originar fissurações que irão afetar gravemente a sua função estabilizadora.

O correto dimensionamento destas componentes é fulcral para evitar problemas, principalmente, de arraste de finos entre fronteiras com materiais de permeabilidades diferentes e devido à sua suscetibilidade à erosão interna. Os filtros apresentam geralmente duas condicionantes que importam respeitar: a sua permeabilidade deve ser superior às partículas do solo protegido (função dreno) e ser suficientemente fino para evitar que as partículas do solo protegido sejam transportadas para os seus vazios.

Comum a estas componentes temos ainda como questões a possível alteração química, a inadequação dos materiais utilizados e o seu dimensionamento, tendo sempre em conta que existe a possibilidade de futuramente serem realizados novos alteamentos do aterro.

Devido à topografia suave e o vale aberto em que a barragem de rejeitados em apreço se insere, é difícil estabelecer limites entre a fundação (II.2) e os encontros com as margens (II.3.1 e II.3.2);

no entanto, o estabelecimento pormenorizado de um limite não é fundamental para esta análise, tendo sido considerado como encontros as zonas com maior inclinação.

A maior inclinação associada aos encontros com as margens dificulta o funcionamento de alguns dos equipamentos utilizados no alteamento do aterro, comprometendo desta forma a eficácia do mesmo, pelo que, problemas como a compactação deficiente dos aterros são mais prováveis. Outro modo de rotura comum, tanto na fundação como nos encontros, é a possibilidade de existir percolação excessiva tanto no corpo da barragem como na zona de contacto.

A barragem em estudo é munida de um descarregador de superfície (II.4), no entanto, como referido anteriormente, o recorrer às suas funcionalidades é considerado um cenário de rotura, uma vez que, dependendo do volume descarregado, irá sempre levar à contaminação, mais ou menos grave, dos terrenos a jusante da instalação de resíduos. Tendo em conta estes argumentos, apenas foi considerada como componente básica a estrutura global do descarregador (II.4.1).

Por último, considera-se o subsistema dos poços drenantes (II.5), que apresenta como componentes básicas os poços (II.5.1) e o sistema de bombagem (II.5.2). Tendo como funções coletar o caudal percolado, tanto pelo corpo da barragem como pela zona superficial da fundação, e restituir esse caudal à albufeira através do sistema de bombagem, estas componentes apresentam funções fundamentais na prevenção de contaminações a jusante numa barragem deste tipo.

Como problemas inerentes a estes componentes encontra-se o arraste de finos, que pode comprometer o funcionamento dos poços, e a possibilidade de haver uma falha de energia ou avaria no sistema de bombagem que, dependendo do número de bombas afetado, do caudal a escoar e do tempo de deteção do problema, pode causar contaminações pontuais ou gerais a jusante.

Um problema especialmente promovido pelo tipo de resíduos armazenados na albufeira é a possível alteração química provocada na estrutura da barragem devido ao ambiente químico agressivo existente neste caso. Como referido na secção 4.2, os rejeitados armazenados terão a propensão para formar lixiviados ácidos, que segundo a bibliografia poderão possuir um pH inferior a três (Matos & Martins, 2006).

Segundo a NP EN 206-1 (2007), um ambiente com pH menor que 4,5 é classificado como sendo um ambiente químico altamente agressivo (XA3), que representa a classe de exposição máxima para o risco de ataque químico no betão. Apesar de se tratar de uma norma aplicada em barragens de betão, demonstra bem a agressividade inerente a um ambiente deste tipo (*op.cit.*).

Algumas das características, tanto da barragem como dos elementos armazenados na albufeira, fazem com que não sejam considerados como perigos, devido à sua probabilidade muito baixa de ocorrência, eventos como:

- Expansibilidade das formações da fundação: pois a tensão induzida pelo peso da barragem supera a tensão provocada pela expansibilidade das formações;
- Floculação do núcleo: são necessários lixiviados básicos para que se dê a floculação da argila sendo que, neste caso, os lixiviados produzidos pelos rejeitados serão ácidos (Santos, et al., 2010);

Apesar de esta obra se encontrar ainda na fase de projeto da barragem de aterro inicial, o alteamento da estrutura no futuro é uma realidade devido à necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento da barragem, prevendo-se a utilização do método de jusante para a sua realização. Este fator é fulcral no dimensionamento desta estrutura, sendo importante tomar as decisões necessárias para que mais tarde este aterro possa suportar um alteamento. No entanto, apesar de não serem alvo desta análise de riscos, é importante referir que tipos de problemas podem advir desta situação.

Para além dos problemas normais referidos para o corpo do primeiro aterro, com a carga exercida pelos sucessivos alteamentos, certos problemas acentuam-se, e.g. a compactação deficiente pode levar a assentamentos mais graves.

Não obstante os problemas causados no primeiro aterro, o corpo dos aterros alteados também serão afetados por alguns desses eventos, que podem levar à perda de funcionalidade, e.g., a alteração química, a vegetação excessiva no talude de jusante, entre outros.

No entanto, a zona de contacto entre o aterro inicial e os diferentes alteamentos, representa uma componente na estrutura que deve ser tratada com especial cuidado. A estes contactos estão associados problemas estruturais como o escorregamento, devido a uma deficiente ligação entre os materiais dos sucessivos alteamentos, e a criação de uma zona de percolação preferencial, que acarreta graves problemas de estabilidade.

4.3.1.2 Seleção e análise do acontecimento iniciador

Com base no que foi referido na secção anterior e tendo em conta o contexto em que se insere a obra em apreço, nesta secção serão apresentados os principais acontecimentos iniciadores considerados neste estudo. Na Figura 4.3 encontram-se organizados por categorias os acontecimentos iniciadores selecionados para análise.

Eventos meteorológicos	Construtivos	Geotécnicos	Geológicos
<ul style="list-style-type: none"> •Balanço hidrológico desfavorável (BHD) •Vento forte 	<ul style="list-style-type: none"> •Falha no sistema de bombagem •Deficiente controlo da compactação (DCC) 	<ul style="list-style-type: none"> •Arraste de finos do núcleo •Arraste de finos para os poços drenantes •Vegetação excessiva 	<ul style="list-style-type: none"> •Alteração química •Formações (estrutura e fraturação)

Figura 4.3 - Acontecimentos iniciadores

De forma a fazer o enquadramento dos acontecimentos iniciadores no sistema da barragem, foi criada a Tabela 4.7, onde estão organizados os eventos por local de ocorrência. Apesar do vento forte e do BHD terem origem na albufeira, foram ainda assim considerados para análise devido à sua importância e possíveis sequências de eventos daí inerentes nos subsistemas II.1 e II.4.

Tabela 4.7 - Acontecimentos iniciadores organizados por componente básica

Subsist.	Componente básica	Acontecimento iniciador
II.1	II.1.1 – MEM	Alteração química; arraste de finos do núcleo; DCC; BHD; vento forte
	II.1.2 – MEJ	Alteração química; arraste de finos do núcleo; DCC; BHD; vento forte
	II.1.3 – Núcleo	Alteração química; arraste de finos do núcleo; DCC
	II.1.4 – Filtro	Alteração química; arraste de finos do núcleo
	II.1.5 – Tapete drenante	Alteração química; arraste de finos do núcleo
	II.1.6 – Geotêxtil	Alteração química; arraste de finos do núcleo
	II.1.7 – Camada de proteção do MEM	Vento forte
	II.1.8 – Camada de proteção do MEJ	Vegetação excessiva (grande e médio porte)
II.2	II.2.1 – Zona imediatamente abaixo do corpo principal	Formações; alteração química
II.3	II.3.1 – Zona de contacto com da barragem com a margem esquerda	Formações; alteração química
	II.3.2 - Zona de contacto com da barragem com a margem direita	Formações; alteração química
II.4	II.4.1 – Estrutura global	BHD; vento forte
II.5	II.5.1 - Poços	Arraste de finos para os poços drenantes
	II.5.2 – Sistema de bombagem	Falha do sistema de bombagem

BHD – Balanço hidrológico desfavorável; DCC – Deficiente controlo da compactação

4.3.1.3 Construção das árvores de eventos

Selecionados os acontecimentos iniciadores, segue-se a fase de construção e análise das respetivas árvores de eventos. Como debatido na secção 3.2.5 desta dissertação, a construção das árvores de eventos é iniciada com a escolha de um acontecimento iniciador que por sua vez irá levar a um

desencadear de acontecimentos que podem culminar num acidente, incidente ou num evento sem consequências.

Árvore 1- Alteração química

Nesta árvore (Figura 4.4) são analisadas as consequências que podem advir da alteração química provocada pelo contacto dos rejeitados com o corpo da barragem.

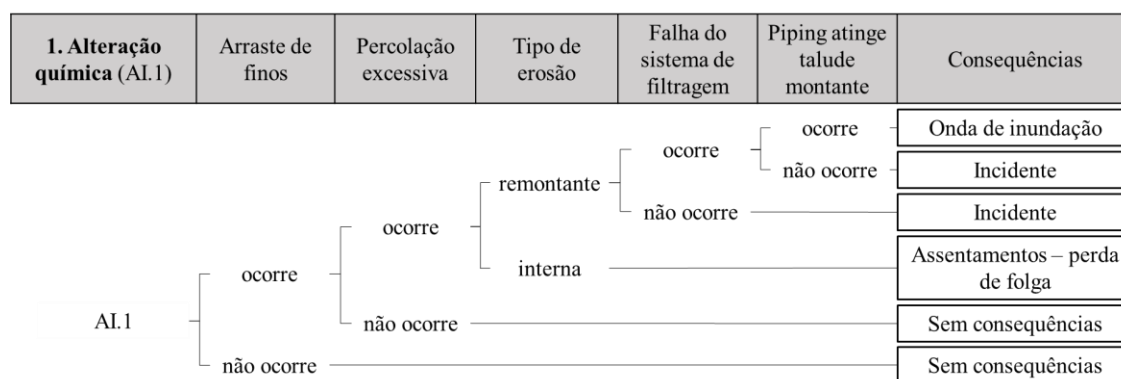


Figura 4.4- Árvore 1: Alteração química

Da ocorrência de alteração química dos elementos dos aterros pode existir a formação de finos, dando a possibilidade à ocorrência de arraste dos mesmos. No entanto, o arraste de finos depende da existência de percolação com velocidade suficiente para os arrastar no sentido do escoamento, não dando tempo a que os materiais circundantes fechem o canal deixado para trás, existindo a possibilidade de formação de um canal de dimensões superiores e com capacidade para provocar danos com maior gravidade ao aterro.

Existem dois tipos de erosão que podem ocorrer nesta situação, remontante ou interna. No caso da erosão interna, dependendo da extensão e diâmetro do canal, e partindo do pressuposto que o canal ocorre apenas no MEM, geralmente irá ocorrer o assentamento do aterro, levando à diminuição da folga relativamente à altura do coroamento e ao aparecimento de fissuras.

No caso da erosão remontante, designada por *piping*, podem ocorrer duas situações com níveis de gravidade diferentes. O quadro mais gravoso é aquele em que o canal originado atinge a superfície do talude de montante, dando origem ao desabamento do coroamento, formando assim uma brecha, cujo efeito final se traduz na rotura da barragem, dando origem a uma onda de cheia no vale jusante. O cenário menos grave é aquele em que o canal não atinge o talude de montante, no entanto, uma vez que esta situação levaria ao incremento significativo da complexidade da árvore, salientando desde logo a importância do NAA (tanto da fase líquida como da fase sólida) para esta sequência de eventos que envolve deslizamentos do talude de montante, e uma vez que

os modos de rotura já observados da árvore já cobrem os possíveis efeitos finais que poderiam recorrer desta situação, não será tido em conta para a análise.

A ocorrência deste acontecimento iniciador na fundação ou encontros leva à alteração dos dois últimos ramos da árvore (referentes ao sistema de filtragem e chegada do *piping* a jusante). Neste caso, estes ramos seriam substituídos por: existe comunicação entre montante e jusante? Em caso afirmativo, o efeito final seria a contaminação generalizada a jusante, uma vez que a alteração química nestes dois subsistemas recairia sobre os materiais de preenchimento das formações geológicas, aumentando a permeabilidade do maciço rochoso. Considerando que esta situação pode ocorrer tanto no caso da erosão remontante ou interna, e os efeitos finais serão os mesmos independentemente do tipo de erosão, o modo de rotura considerado será a percolação excessiva pela fundação e encontros.

Árvore 2 – Balanço hidrológico desfavorável

A árvore 2 (Figura 4.5) é construída com base na ocorrência de um balanço hidrológico desfavorável que se traduz numa precipitação anormal que poderá levar, em circunstâncias singulares, ao galgamento do coroamento do aterro.

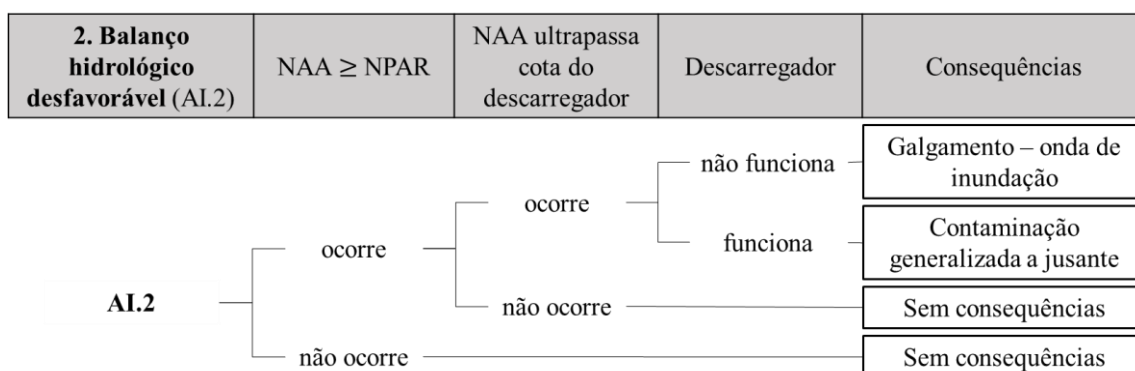


Figura 4.5 - Árvore 2: Balanço hidrológico desfavorável (BHD)

A probabilidade de se verificarem consequências graves de um evento iniciador deste tipo é significativamente baixa, uma vez que o descarregador foi dimensionado para uma cheia com um período de retorno de 5 000 anos; no entanto, esta análise não poderia deixar de ser realizada devido às perdas que podem advir da sua ocorrência.

O primeiro estado que revoga qualquer tipo de efeito é o nível de água da albufeira estar abaixo do NPAR. Contrariamente, a forte precipitação pode fazer com que haja uma subida do NAA até à cota do descarregador; no entanto, dependendo do seu estado e da capacidade de escoamento ser capaz de escoar o caudal necessário, o descarregador pode ou não funcionar.

Ambos os casos expostos apresentam desfechos com graus de gravidade consideráveis. No caso em que o descarregador funciona normalmente, existirá a libertação de uma massa de água que irá resultar na contaminação dos terrenos a jusante. Por oposição, se o descarregador não

funcionar como é suposto, ocorrerá o galgamento da barragem que causará a erosão externa do talude de jusante que culminará na rotura da barragem e a formação de uma onda de cheia.

Árvore 3 – Formações

As formações geológicas têm um papel fundamental no condicionamento da percolação dos rejeitados depositados na albufeira, tanto pela fundação como pelas margens, incluindo as zonas de contato dos encontros. As formações, devido às suas diferenças na forma como condicionam a percolação, serão divididas em dois tipos: Estrutura, que inclui os dobramentos e falhas; Fraturação, que inclui as famílias das diaclases.

A diferença significativa entre estes dois tipos de formações reside na persistência superior que a estrutura apresenta, traduzindo-se os seus efeitos numa propagação mais alargada da sua continuidade, tanto na horizontal como na vertical, levando ao aumento da probabilidade de transporte de contaminações a maiores distâncias relativamente à origem.

Na Figura 4.6 apresenta-se a árvore 3a referente à estrutura geológica das formações. Independentemente do tipo de formação geológica analisada é importante diferenciar a sua inclinação, orientação e a sua permeabilidade. Assim sendo estas diferenciações foram efetuadas conferindo consequências distintas para os vários casos apresentados.

O cenário mais grave é aquele em que a permeabilidade é relativamente elevada, a inclinação tende para jusante com menos de 20° e a direção é paralela ao eixo da barragem, traduzindo-se em ambos os casos, estrutura e fraturação, numa contaminação generalizada a jusante. No extremo oposto temos todos os casos em que a permeabilidade é baixa (coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-8} m/s), não havendo efeitos finais graves resultantes desta situação, uma vez que a percolação iria ser demasiado lenta e os seus efeitos só seriam problemáticos ao fim de muitos anos, dando tempo de ser detetada e mitigada a situação.

Outro parâmetro que desempenha um papel fundamental na propagação da contaminação é o grau de inclinação das formações, sendo que quanto menor for a inclinação maior é o esforço necessário para que a percolação atinja zonas mais distantes relativamente à albufeira. O que fará a diferença entre a contaminação a jusante ou das zonas envolventes da albufeira, é a direção da inclinação das formações.

Como referido anteriormente, uma vez que a estrutura apresenta maior persistência relativamente à fraturação, os efeitos finais serão mais graves para o caso da estrutura (dobras e falhas), sendo esta a diferença significativa entre as árvores 3a e 3b (Figura 4.7).

De forma a simplificar a quantidade de diferentes consequências registadas nesta árvore, uma vez que estas serão utilizadas para a restante análise, serão identificados quais os modos de rotura que terão uma maior probabilidade de ocorrência e excluídos os mais improváveis; para tal são

utilizados os dados apresentados na secção 4.2. Com base nesses dados foi possível verificar que para a:

- Estrutura:
 - ❖ Dobras – inclinam para jusante com 75° e são oblíquas ao eixo;
 - ❖ Falhas – inclinam para montante.
- Fraturação
 - ❖ Família 1 – inclina para jusante e montante com 80° - 70° e é oblíqua ao eixo;
 - ❖ Família 2 – inclina para jusante e montante com 80° - 70° e é paralela ao eixo;
 - ❖ Família 3 – inclina para montante;
 - ❖ Família 4 – inclina para os encontros com 80° - 70° e é perpendicular ao eixo.

Assim, com base nesta informação, considerou-se que os efeitos finais relevantes para a análise são para a estrutura a contaminação generalizada a jusante a longo prazo; e para a fraturação a contaminação generalizada a jusante a longo prazo e contaminações pontuais a jusante a longo prazo.

3a. Formações - Estrutura (AI.3a)	Inclinação	Direção (em relação ao eixo da barragem)	Angulo da inclinação	Permeabilidade baixa	Consequências
AI.3a	Jusante	Paralela ao eixo	< 20°	não	Contaminação generalizada a jusante
				sim	Sem consequências
			20° - 70°	não	Contaminação generalizada a jusante
				sim	Sem consequências
			> 70°	não	Contaminação generalizada a jusante a longo prazo
				sim	Sem consequências
		Oblíqua ao eixo	< 20°	não	Contaminação generalizada a jusante
				sim	Sem consequências
			20° - 70°	não	Contaminação generalizada a jusante a longo prazo
				sim	Sem consequências
			> 70°	não	Contaminação generalizada a jusante a longo prazo
				sim	Sem consequências
	Encontros	Perpendicular ao eixo	< 20°	não	Contaminação generalizada nas zonas envolventes
				sim	Sem consequências
			20° - 70°	não	Contaminação generalizada nas zonas envolventes a longo prazo
				sim	Sem consequências
			> 70°	não	Contaminação generalizada nas zonas envolventes a longo prazo
				sim	Sem consequências
	Montante				Sem consequências

Figura 4.6 - Árvore 3a: Formações - estrutura

3b. Formações – Fraturação (AI.3b)		Inclinação	Direção (em relação ao eixo da barragem)	Angulo da inclinação	Permeabilidade baixa	Consequências
AI.3b	Jusante	Paralela ao eixo		< 20°	não	Contaminação generalizada a jusante
					sim	Sem consequências
				20° - 70°	não	Contaminação generalizada a jusante
					sim	Sem consequências
				> 70°	não	Contaminação generalizada a jusante a longo prazo
					sim	Sem consequências
		Obliqua ao eixo		< 20°	não	Contaminações pontuais a jusante
					sim	Sem consequências
				20° - 70°	não	Contaminações pontuais a jusante a longo prazo
					sim	Sem consequências
				> 70°	não	Contaminações pontuais a jusante a longo prazo
					sim	Sem consequências
	Encontros	Perpendicular ao eixo		< 20°	não	Contaminações pontuais nas zonas envolventes
					sim	Sem consequências
				20° - 70°	não	Contaminações pontuais nas zonas envolventes a longo prazo
					sim	Sem consequências
	Montante			> 70°	não	Sem consequências
					sim	Sem consequências

Figura 4.7 - Árvore 3b: Formações - fraturação

Árvore 4 – Vento forte

Outro evento meteorológico que pode causar sérias complicações para a estrutura, é a ondulação provocada pelo vento que atinge a superfície da água armazenada na albufeira. A formação de ondulação por parte do vento depende de um número significativo de fatores, tais como a velocidade do vento, direção, tempo de duração do vento, entre outros. No entanto, não se enquadra no âmbito desta dissertação fazer uma pormenorização do tema, sendo apenas importante averiguar as consequências que advém da sua ocorrência.

As circunstâncias que levam à criação de riscos derivados deste acontecimento iniciador dependem numa primeira fase do NAA. Neste sentido, analisando primeiro o caso em que o NAA é maior ou igual que NPA (Figura 4.8) pode-se dar o cenário no qual a ondulação atinge a cota do coroamento, estando iminente o galgamento da barragem. Caso tal cenário se concretize e dependendo da sua duração, o efeito do galgamento da barragem pelas ondas de vento leva à erosão do talude de jusante que, como visto anteriormente (Figura 4.5), resultará em última instância na formação de uma brecha na zona de galgamento, que provocará a rotura da estrutura e consequente formação de uma onda de inundação.

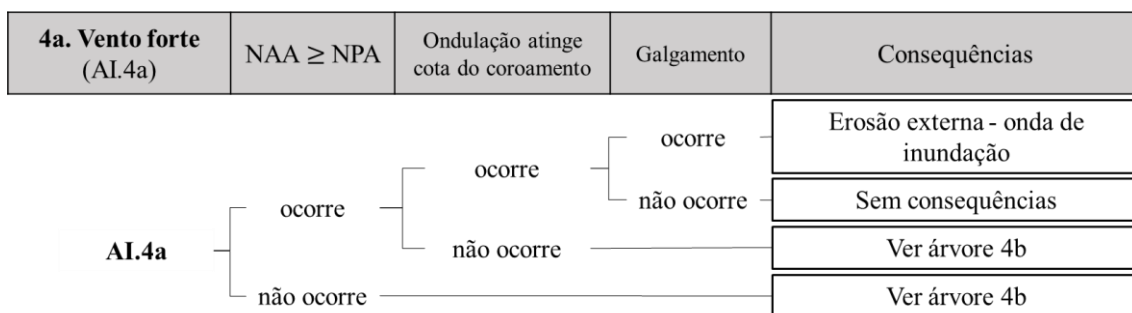


Figura 4.8 - Árvore 4a: Vento forte

No entanto, se o NAA estiver abaixo do NPA, representado na árvore 4b (Figura 4.9), não existe risco de a ondulação chegar ao topo da barragem, mas por outro lado pode haver a destruição do sistema de proteção do MEM. A existência de consequências graves, da destruição deste sistema de defesa do MEM, obriga à existência prévia de diversos acontecimentos. Partindo da premissa de que o NAA tem de estar abaixo da zona de destruição para que os agentes erosivos possam provocar estragos suficientes para a erosão chegar ao MEM e, consequentemente, criar uma instabilização do talude. O contrário não pode acontecer, uma vez que, se a zona destruída estiver submersa, os agentes erosivos não poderão atuar no local.

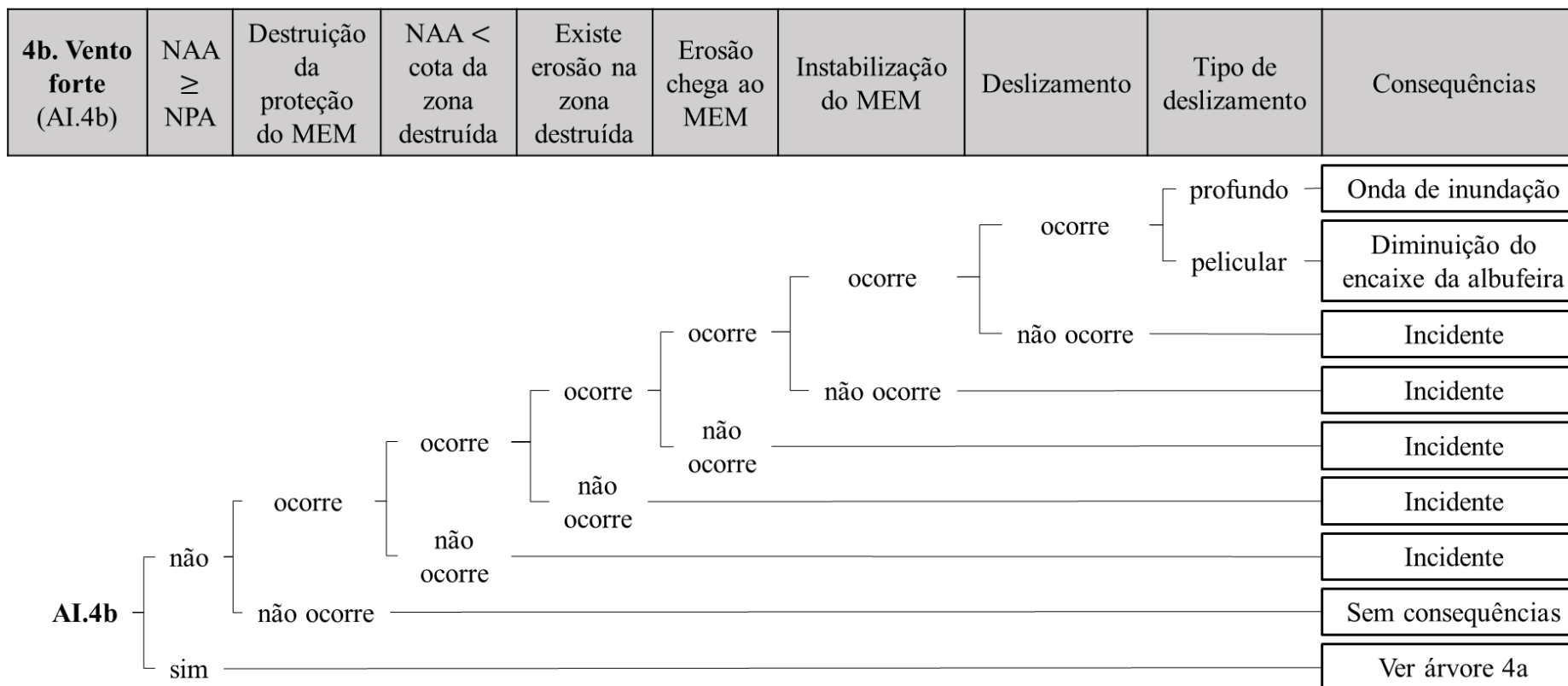


Figura 4.9 - Árvore 4b: Vento forte

A forte erosão provocada pelos vários agentes pode em casos extremos, levar a uma grande instabilização do talude de montante que pode gerar o seu deslizamento. Este deslizamento pode ser de dois tipos, profundo ou pelicular. Sendo o menos grave o deslizamento pelicular, este leva geralmente apenas à instabilização do MEM que, para garantir que daí não advém consequências mais problemáticas, é exigida a intervenção de forma a reduzir a instabilização do MEM. O inverso acontece para o deslizamento profundo que, na maioria dos casos, resultará na rotura da barragem e consequente libertação repentina da água e rejeitados armazenados na albufeira, conduzindo a consequências com um grau de gravidade elevada.

Árvore 5 – Arraste de finos do núcleo

O arraste de finos do núcleo é um dos acontecimentos iniciadores mais problemáticos, não só pela sua complexidade, mas também pelas consequências que podem advir da sua conjugação com uma sucessão de acontecimentos. No entanto, observando a árvore 5 (Figura 4.10), para que esta sucessão de acontecimentos se concretize é preciso desde logo que exista uma falha no sistema de filtragem, uma vez que a movimentação de partículas seria interrompida pelos filtros.

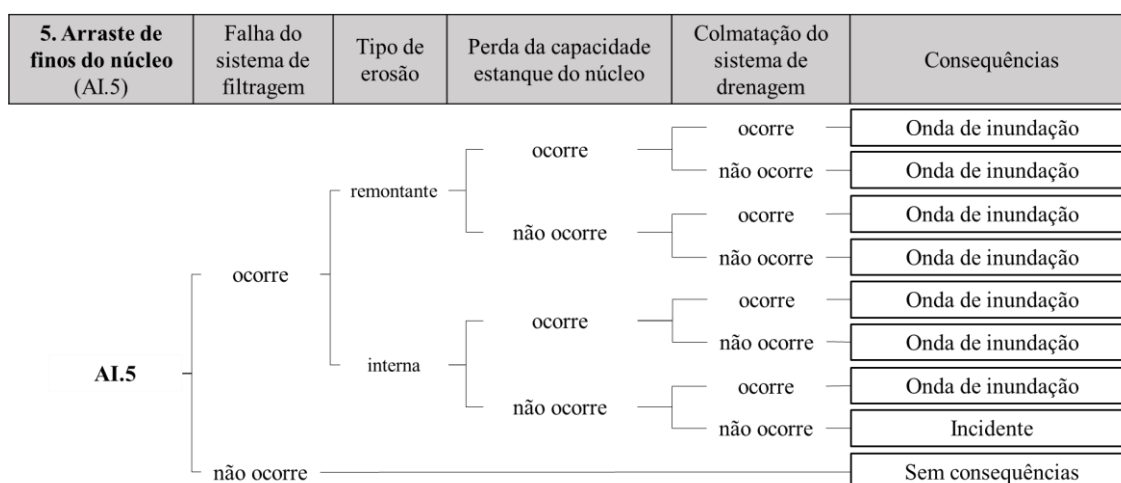


Figura 4.10 - Árvore 5: Arraste de finos do núcleo

Existe a possibilidade de ocorrer arraste de finos no interior da barragem sem que estes sejam afetados pelo sistema de filtragem, no entanto, estas movimentações, tal como referido na árvore 1, não serão interpretados nesta análise.

Tal como na árvore 1 (alteração química) se a percolação de água for suficientemente forte irá ocorrer erosão que, dependendo da sua direção, tanto pode ser remontante ou interna. Ambos os casos podem levar a perda da capacidade estanque do núcleo devido ao estabelecimento de canais de percolação preferencial no seu interior pela remoção de finos. Assim, ocorrerá a subida do nível de água no interior do talude de jusante, uma vez que o núcleo perde a sua capacidade de diminuição da carga hidráulica no MEJ. O cenário mais extremo, no qual o nível de água chega à superfície do talude de jusante, conduzirá à instabilização e deslizamento do talude, que por sua

vez levará à sua rotura e consequente onda de inundação. Para não tornar a árvore mais complexa, o deslizamento e o seu tipo não foram incluídos, uma vez que os restantes ramos seriam iguais aos três últimos estados da árvore 4b, com a única diferença de, neste caso, o evento instala-se no talude de jusante.

Esta situação pode ainda ser agravada se os finos arrastados pela percolação no corpo da barragem acabarem por se alojar no sistema de drenagem, o que levará à sua colmatção. Este evento piora a situação, pois vai ser mais um elemento a causar a subida do nível da água no talude de jusante, produzindo os mesmos efeitos.

Árvore 6 – Arraste de finos para os poços drenantes

Como referido na secção 4.3.1.1, o funcionamento adequado dos poços drenantes é fundamental para uma barragem deste tipo. Desta forma, o arraste de finos para este sistema pode comprometer as suas funções, levando à ocorrência de possíveis contaminações a jusante da albufeira.

O arraste de finos pode originar dois resultados possíveis, como demonstrado na Figura 4.11: à sedimentação de finos no fundo dos poços; ou à colmatção dos poços. O primeiro cenário é um incidente com potencialidade para causar contaminações localizadas na vizinhança dos poços, sendo necessária a limpeza dos poços afetados de forma a evitar a colmatção dos mesmos a longo prazo; no entanto, o efeito final será a contaminação localizada na zona vizinha dos poços.

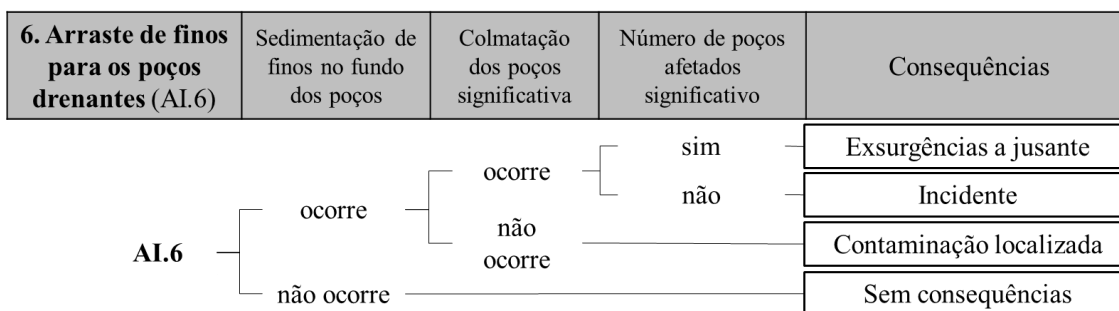


Figura 4.11 - Árvore 6: Arraste de finos para os poços

No caso de ocorrer uma colmatção significativa dos poços e o seu número for apreciável, as consequências poderão ser mais graves, levando a exsurgências a jusante, cuja gravidade depende do caudal percolado até aos poços.

Árvore 7 – Falha do sistema de bombagem dos poços

Tal como na árvore anterior (árvore 6), a falha do sistema de bombagem irá comprometer a função dos poços drenantes, conduzindo a consequências semelhantes. Em ambos os casos, a gravidade da contaminação provocada a jusante pela falha do sistema, irá depender do caudal percolado pelo aterro e fundação.

A origem da falha do sistema não será analisada; no entanto esta pode ter duas origens principais: uma avaria mecânica; ou uma falha na fonte de energia do sistema. Em ambos os casos as consequências seriam as mesmas e o número de bombas afetadas iria variar, independentemente da origem.

Uma vez que é um dos fatores mais importantes numa falha deste género, o primeiro evento desta árvore tem que considerar o número de bombas afetadas pela falha do sistema (Figura 4.12). Se as bombas que se mantiverem em funcionamento suportarem o caudal captado pelos poços drenantes, não existem consequências a curto prazo. No entanto, a longo prazo, é necessária a retificação do sistema de forma a garantir a devolução de todo o caudal percolado à albufeira.

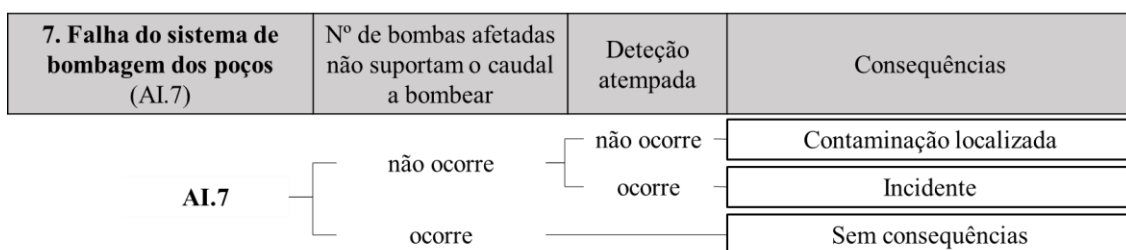


Figura 4.12 - Árvore 7: Falha do sistema de bombagem dos poços

Por oposição, se existir a incapacidade de escoar o caudal captado pelos poços, devido ao número de bombas afetadas ser elevado, se os mecanismo de deteção falharem e se não existir uma intervenção atempada, a consequência final deste seguimento de eventos proporciona a contaminação localizada dos terrenos a jusante.

Árvore 8 – Vegetação excessiva

O descontrolo da vegetação enraizada no talude de jusante pode trazer graves problemas para a estabilidade deste talude, dependendo do porte da vegetação instalada. Neste seguimento, a árvore 8 (Figura 4.13), inicia-se com o tipo de porte da vegetação enraizado no talude.

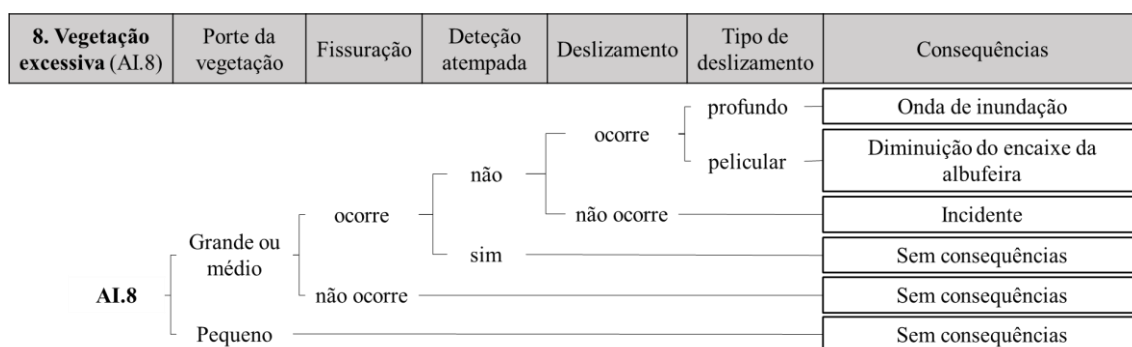


Figura 4.13 - Árvore 8: Vegetação excessiva

Apenas vegetação de porte médio e grande podem carregar consequências para a estabilidade do aterro. As forças aplicadas pelas raízes deste tipo de vegetação pode ser suficiente para provocar fissuração na superfície do talude de jusante que, no caso de não ser detetado atempadamente,

pode evoluir para um deslizamento do talude em circunstâncias extremas. Tal como nas árvores 4b e 5, esta culminará na ocorrência de um deslizamento pelicular ou profundo, que no pior cenário levará à rotura da barragem e consequente libertação de uma onda de inundação.

Árvore 9 – Deficiente controlo da compactação

Um deficiente controlo da compactação viabiliza a conclusão de um aterro com problemas de compacidade, sendo esta a premissa que suporta a construção da árvore 9 (Figura 4.14).

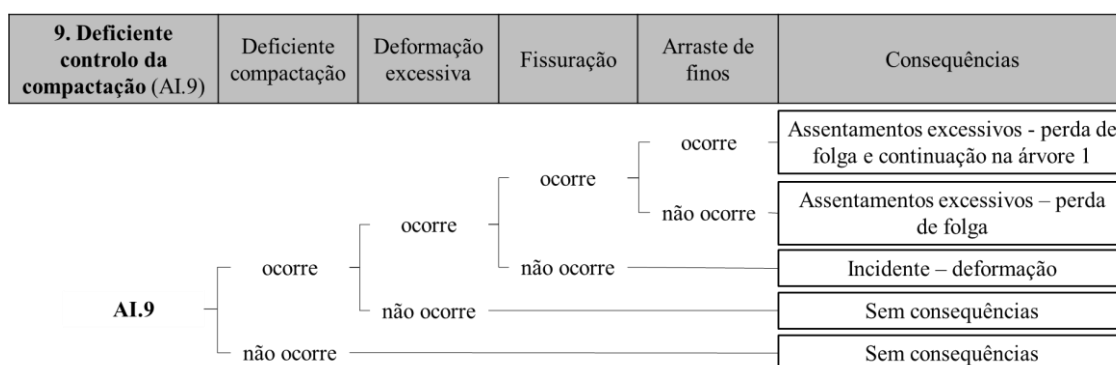


Figura 4.14 - Árvore 9: Deficiente controlo da compactação

O primeiro evento que poderá resultar de uma deficiente compactação de um aterro é a deformação excessiva e consequente fissuração do corpo da barragem. Esta sequência de acontecimentos, por si só, poderá gerar assentamentos excessivos dos aterros, que resultam na diminuição da folga da barragem relativamente ao seu coroamento inicial.

Agregada à fissuração causada pela deformação excessiva, poderão existir problemas de arraste de finos. Uma vez que os ramos que daí advém já foram debatidos anteriormente, e de forma a manter a simplicidade da árvore, a análise termina nos assentamentos excessivos podendo ser encontrados os restantes ramos e consequências na árvore 1 (alteração química).

Concluída a análise das árvores é então possível retirar os modos de rotura daí resultantes, bem como o respetivo efeito final. Neste seguimento, na Tabela 4.8 apresentam-se estes mesmos resultados organizados segundo o subsistema onde ocorrem.

Tabela 4.8 - Modos de rotura dos subsistemas do caso de estudo

Subsistema	Modo de rotura	Efeito final
II.1 – Corpo principal	<i>Piping</i>	Onda de inundação
	Deslizamento profundo	Onda de inundação
	Deslizamento pelicular	Diminuição do encaixe da albufera
	Assentamentos excessivos	Perda de folga
	Galgamento	Onda de inundação
II.2 – Fundação	Percolação excessiva	Contaminação generalizada a jusante a longo prazo
		Contaminação pontuais a jusante a longo prazo
		Contaminação generalizada a jusante
II.3 – Encontros	Percolação excessiva	Contaminação generalizada a jusante a longo prazo
		Contaminação pontuais a jusante a longo prazo
		Contaminação generalizada a jusante
II.4 – Descarregador de cheias	Funcionamento do descarregador	Contaminação generalizada a jusante
II.5 – Poços drenantes	Colmatação dos poços	Exsurgências a jusante
	Sedimentação dos poços	Contaminação localizada
	Falha do sistema de bombagem	Contaminação localizada

4.3.1.4 Determinação do risco

Até esta secção a análise realizada foi apenas descritiva, o que limita a interpretação dos resultados. Com a intenção de tornar mais expressiva a importância relativa de cada modo de rotura identificado, para cada componente da barragem, avaliou-se a severidade das suas consequências e a sua verosimilhança de ocorrência. Uma abordagem probabilística de todos os modos de rotura é impraticável face à inexistência de informação suficiente e à morosidade de aplicação, não garantindo uma análise quantitativa fidedigna.

Assim, para aplicação de uma análise semi-quantitativa foram utilizadas classes de verosimilhança e de severidade das consequências para a análise de cada modo de rotura identificado, com base nas informações disponíveis apresentadas anteriormente, e com recurso à bibliografia.

De seguida exibem-se as tabelas utilizadas para a realização da classificação dos modos de rotura e acontecimentos iniciadores, segundo a sua verosimilhança e severidade das consequências, com base na adaptação de conceitos recomendados em estudos semelhantes para a gestão de riscos em barragens.

Importa referir que a ocupação dos terrenos a jusante da infraestrutura é realizada maioritariamente por terrenos agrícolas, sendo que a população em risco são os trabalhadores destas áreas agrícolas e eventuais trabalhadores da mina que possam estar a jusante da barragem. Trata-se de uma barragem cuja potencialidade para provocar a contaminação dos aquíferos da região é praticamente inexistente, devido à geologia da mesma; no entanto, é importante considerar o pior cenário possível e ter em conta que podem ocorrer feridos ligeiros, através do consumo de água contaminada de eventuais poços instalados para rega. Assim, estima-se que no

âmbito da saúde e segurança humana a PAR é inferior a 10 pessoas; no contexto dos impactes ambientais, consideram-se como organismos expostos os animais (e.g., gado bovino e caprino), pastos, linhas de água e vegetação (e.g., sobreiros); na conjuntura dos impactos económicos/custos, julgam-se cobertos por esta classe os custos inerentes à reparação da infraestrutura, indemnizações e compensações.

No que diz respeito a verosimilhança, será empregue uma classificação com cinco classes, do muito pouco provável ao muito provável (Tabela 4.9). As consequências serão classificadas separadamente (Tabela 4.10) por três áreas distintas: saúde e segurança humana (SSH); impacto ambiental (IA); impacto económico/custos (IE). O escalonamento adotado procura traduzir a gravidade relativa das consequências.

Tabela 4.9 - Classes de verosimilhança (adaptado de Robertson, et al., 2003)

Classe de verosimilhança	Intervalo de probabilidade	Possibilidade de ocorrência
1	< 0,1 %	Muito pouco provável
2	0,1 – 1 %	Pouco provável
3	1 – 10 %	Ocasional
4	10 – 20 %	Provável
5	> 20 %	Muito provável

Tabela 4.10 - Classes de consequências (adaptado de Robertson, et al., 2003)

Classe de consequências	Saúde e segurança humana (SSH)	Impacte ambiental (IA)	Impacto económico/custos (IE) (% do custo da obra)
0	Sem feridos	Sem impacte mensurável	Muito baixo 0%
2	1 -2 feridos ligeiros	Impacte pequeno e localizado	Baixo < 0.5%
4	> 2 feridos ligeiros	Impacte mensurável na região	Médio 0.5 – 1%
8	Feridos graves	Impacte significativo, mas reversível	Elevado 1 – 1.5%
16	Fatalidades	Impacte elevado e irreversível (catastrófico)	Muito elevado > 1.5%

Na Tabela 4.11 apresentam-se, com base na análise concretizada, os principais modos de rotura que afetam a estrutura, organizados por subsistema, bem como a sua classificação quanto à verosimilhança e severidade das consequências, condicionadas pelas Tabelas 4.9 e 4.10. De forma a realizar uma classificação mais precisa, e para tirar maior partido das árvores contruídas, foi incluída na tabela o acontecimento iniciador que desencadeia o modo de rotura, tornando possível atuar de forma localizada, com a aplicação de medidas de controlo na árvore que apresentar uma classe de verosimilhança superior para o mesmo modo de rotura, uma vez que os efeitos finais (consequências) serão os mesmos.

Tabela 4.11- Classificação dos modos de rotura quanto à verosimilhança de ocorrência e severidade das consequências

Subsist.	Modo de rotura	AI	Classe de verosimilhança	Classe de consequências		
				SSH	IA	IE
II.1	Piping	Alteração química	2	16	16	16
		Arraste de finos do núcleo	1			
		DCC	2			
	Deslizamento profundo	Vento forte	1	16	16	16
		Vegetação excessiva	1			
		Arraste de finos do núcleo	1			
	Deslizamento pelicular	Vento forte	2	0	0	4
		Vegetação excessiva	2			
		Arraste de finos do núcleo	1			
	Assentamentos excessivos	DCC	2	0	0	4
II.2	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (estrutura)	2	2	8	4
		Formações (fraturação)	1	2	8	4
	Percolação excessiva (EF: 2)			0	2	2
	Percolação excessiva	Alteração química	2	2	8	4
	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (estrutura)	2	2	8	4
	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (fraturação)	1	2	8	4
	Percolação excessiva (EF: 2)			0	2	2
	Percolação excessiva	Alteração química	2	2	8	4
	Funcionamento do descarregador	BHD	2	2	16	4
	Colmatação dos poços	Arraste de finos para os poços	2	4	8	4
II.5	Sedimentação dos poços	Arraste de finos para os poços	3	2	4	2
	Falha do sistema de bombagem	Falha do sistema de bombagem	3	0	2	2

BHD – balanço hidrológico desfavorável; DCC – deficiente controlo da compactação; EF:1 – efeito final contaminação generalizada a jusante a longo prazo; EF: 2 – efeito final contaminações pontuais a jusante a longo prazo

Pelo facto de esta obra ainda se encontrar em fase de projeto, a atribuição de classes de verosimilhança apresenta um grau de subjetividade elevado, uma vez que não é possível retirar conclusões do comportamento da infraestrutura através da inspeção visual e leitura da instrumentação instalada. Neste sentido, e de forma a minimizar a subjetividade deste processo, para a atribuição de classes, à verosimilhança e à severidade das consequências, foram tidos em conta dados estatísticos históricos, o julgamento de engenharia e a ordenação relativa.

Os valores mais baixos de verosimilhança foram atribuídos aos eventos meteorológicos, devido ao elevado período de retorno conferido a estes fenómenos no projeto. No entanto, nos casos em que existem dois ou mais modos de rotura associados a este tipo de acontecimentos iniciadores será atribuída uma maior verosimilhança ao fenómeno que requer uma ação menos extrema desse evento meteorológico. No caso do vento forte, relativamente à destruição da proteção do MEM, é exigida para o efeito final de deslizamento pelicular uma ação menos extrema por parte do vento e dos agentes erosivos, comparativamente ao efeito final de deslizamento profundo, tendo sido dada uma classe de verosimilhança mais alta ao primeiro cenário.

Similarmente foi atribuída uma classe de verosimilhança mais baixa aos acontecimentos iniciadores que, para alcançarem o modo de rotura, necessitam que haja, desde logo, a falha do sistema de filtragem da barragem. Partindo do pressuposto de que esta foi bem dimensionada, a falha completa do sistema de filtragem é um evento muito pouco provável.

Por oposição, para os casos em que a falha humana está diretamente associada a um evento da sequência do modo de rotura de uma árvore, ou para os casos em que a falta de manutenção de certas estruturas atuam de forma direta na propagação de eventos indesejáveis, foi atribuída uma classe de verosimilhança superior. Os casos da colmatagem e sedimentação dos poços drenantes ilustram esta situação. Para que estes eventos ocorram, para além da premissa inicial de existir arraste de finos para os poços, é necessária a falha da inspeção visual da barragem e da manutenção da mesma. No entanto, será mais uma vez atribuída uma maior verosimilhança ao modo de rotura que requer uma ação menos extrema por parte do acontecimento iniciador.

Outro acontecimento iniciador que foi classificado com uma classe de verosimilhança superior foi a falha do sistema de bombagem uma vez que, associado a este modo de rotura, estão falhas elétricas e avarias mecânicas (e.g., trovoadas), sendo estes incidentes ordinários comparativamente aos restantes em análise.

A análise de riscos realizada culminará com a classificação do risco. No entanto é necessário definir e aplicar uma fórmula que relacione as classes de verosimilhança com a severidade das consequências. Neste sentido foi definida a equação 4.1:

$$Ri = Veros \times (0,6 \times SSH + 0,25 \times IA + 0,15 \times IE) \quad (4.1)$$

Em que Ri representa o risco, $Veros$ a classe de verosimilhança, SSH a classe de consequências da saúde e segurança humana, IA a classe de consequências do impacto ambiental e IE a classe de consequências do impacto económico/custos.

Na ponderação das consequências foi dada maior importância relativa aos acidentes que envolvem a vida e saúde humana, sendo este o parâmetro que mais influencia a ponderação. Para o impacto ambiental e impacto económico/custos foi dada uma importância ligeiramente superior à questão ambiental dada a especificidade dos materiais que serão armazenados na albufeira.

Com o objetivo de transmitir uma noção da influência individual de cada tipo de consequência foram calculadas as respetivas matrizes de risco. Na Tabela 4.12 apresenta-se a matriz de riscos da segurança e saúde humana.

Tabela 4.12 - Matriz de risco da SSH

		SSH				
		0	2	4	8	16
Verosimilhança	1	0	1,2	2,4	4,8	9,6
	2	0	2,4	4,8	9,6	19,2
	3	0	3,6	7,2	14,4	28,8
	4	0	4,8	9,6	19,2	38,4
	5	0	6	12	24	48

A Tabela 4.13 representa a matriz de riscos do impacto ambiental.

Tabela 4.13 - Matriz de risco do IA

		IA				
		0	2	4	8	16
Verosimilhança	1	0	0,5	1	2	4
	2	0	1	2	4	8
	3	0	1,5	3	6	12
	4	0	2	4	8	16
	5	0	2,5	5	10	20

A Tabela 4.14 mostra a matriz de riscos do impacto económico/custos.

Tabela 4.14 - Matriz de risco do IE

		IE				
		0	2	4	8	16
Verosimilhança	1	0	0,3	0,6	1,2	2,4
	2	0	0,6	1,2	2,4	4,8
	3	0	0,9	1,8	3,6	7,2
	4	0	1,2	2,4	4,8	9,6
	5	0	1,5	3	6	12

Com a aplicação da equação 4.1 foi possível fazer a classificação do risco para posterior apreciação dos mesmos (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 - Análise do risco para o caso hipotético

Subsist.	Modo de rotura	AI	Risco
II.1	<i>Piping</i>	Alteração química	32,0
		Arraste de finos do núcleo	16,0
		DCC	32,0
	Deslizamento profundo	Vento forte	16,0
		Vegetação excessiva	16,0
		Arraste de finos do núcleo	16,0
	Deslizamento pelicular	Vento forte	1,2
		Vegetação excessiva	1,2
		Arraste de finos do núcleo	0,6
	Assentamentos excessivos	DCC	1,2
II.2	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (estrutura)	7,6
	Percolação excessiva (EF: 2)	Formações (fraturação)	0,8
II.3	Percolação excessiva	Alteração química	7,6
	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (estrutura)	7,6
	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (fraturação)	3,8
	Percolação excessiva (EF: 2)		0,8
II.4	Funcionamento do descarregador	BHD	11,6
II.5	Colmatção dos poços	Arraste de finos para os poços	10,0
	Sedimentação dos poços	Arraste de finos para os poços	7,5
	Falha do sistema de bombagem	Falha do sistema de bombagem	2,4

Legenda: BHD – balanço hidrológico desfavorável; DCC – deficiente controlo da compactação; EF:1 – efeito final contaminação generalizada a jusante a longo prazo; EF: 2 – efeito final contaminações pontuais a jusante a longo prazo

4.3.2 Apreciação de riscos semi-quantitativa

Identificados os valores de risco para os modos de rotura e acontecimentos iniciadores considerados, segue-se o estabelecimento dos níveis de risco que apoiarão a tomada de decisões relativamente à necessidade de redução dos valores de risco.

Instituíram-se quatro níveis de risco (Tabela 4.16): intolerável, significativo, tolerável e aceitável. Para o limite inferior do nível intolerável do risco foi estabelecido o valor 9,6. Este valor corresponde a um efeito final sem feridos e com IA e IE elevados para uma verosimilhança

ocasional. Assim, para a verosimilhança mínima, se existirem perdas de vidas humanas e o IA e o IE forem nulos, o risco seria intolerável ($R_i=9,6$). O mesmo sucede se a verosimilhança for ocasional, não existirem IA e IE e existirem feridos graves, o risco continuará a ser intolerável.

O nível significativo de risco foi limitado inferiormente pelo valor 6,9. Para determinar este valor foi considerado uma verosimilhança ocasional, um índice de SSH de 0 (sem feridos), um IA significativo mas reversível e o IE é considerado baixo ($< 0,5\%$ do custo da obra). Sendo este o valor mínimo, se a verosimilhança for mantida e se existirem mais de dois feridos ligeiros, existindo IA e IE nulos, o risco seria considerado significativo.

Tabela 4.16 - Critérios de aceitabilidade e tolerabilidade do risco

Classe de risco	Nível do risco	Valor do risco (R_i)	Tipo de ação
1	Aceitável	[0 ; 3,2]	Risco é considerado banal e devidamente controlado. Recomendadas ações de vigilância que possibilitem a deteção atempada de indícios iniciais da materialização de um perigo. Apertar malha de monitorização e de inspeção, tornando-as mais frequentes, no caso de o índice valor do risco estiver perto do limite superior do nível do risco.
2	Tolerável	[3,2 ; 6,9]	Risco considerado tolerável a fim de garantir certos benefícios, no entanto o princípio ALARP tem que ser respeitado, neste sentido devem ser aplicadas medidas de redução de riscos (mitigação e/ou prevenção). Apertar malha de monitorização e de inspeção, tornando-as mais frequentes, especialmente se o índice valor do risco estiver perto do limite superior do nível do risco.
3	Significativo	[6,9 ; 9,6]	Risco é considerado elevado. Necessária a adoção de medidas de redução de risco (mitigação e/ou prevenção). Se após a sua aplicação o nível de risco residual resultar ainda significativo, deve proceder-se a um estudo que fundamente a aplicação de um plano de emergência e de novas medidas de controlo. Se os perigos forem identificados na fase de construção, a execução dos trabalhos deve ser suspensa até à implementação das medidas de redução de riscos e proceder-se ao estudo acima indicado. Apertar malha de monitorização e de inspeção, tornando-as mais frequentes.
4	Intolerável	[9,6 ; 80]	Risco é considerado inaceitável independentemente dos benefícios. Necessária a adoção de medidas de redução de risco (mitigação e/ou prevenção). Devem ser interrompidos todos os trabalhos na barragem e todos os esforços devem ser direcionados para a redução do risco, sendo retomados os trabalhos apenas quando as medidas adotadas apresentaram uma redução do nível de risco. No entanto se após a sua aplicação o nível de risco residual resultar ainda significativo ou tolerável, deve-se proceder a um estudo que fundamente a aplicação de um plano de emergência e de novas medidas de controlo. Apertar malha de monitorização e de inspeção, tornando-as mais frequentes.

Por último definiu-se, o limite inferior no nível tolerável de risco, ou o limite superior do nível aceitável de risco. Para este limite foi estipulado o valor 3,2, correspondente a um evento pouco

provável com capacidade de provocar um IA mensurável na região e um IE médio (0,5 – 1% do custo da obra), não existindo feridos de qualquer tipo. Desta forma se a verosimilhança aumentar para ocasional, e considerado um evento com capacidade de provocar um a dois feridos ligeiros, mesmo sem IA e IE, este risco seria considerado acima do nível aceitável.

Com a aplicação dos níveis de risco da Tabela 4.16 à Tabela 4.15, resultante da análise de riscos, conclui-se então a avaliação de riscos. Assim apresenta-se de forma sintetizada a Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Apreciação do risco para o caso hipotético

Subsist.	Modo de rotura	AI	Risco	Nível de risco/Classe de risco
II.1	Piping	Alteração química	32,0	4
		Arraste de finos do núcleo	16,0	4
		DCC	32,0	4
	Deslizamento profundo	Vento forte	16,0	4
		Vegetação excessiva	16,0	4
		Arraste de finos do núcleo	16,0	4
	Deslizamento pelicular	Vento forte	1,2	1
		Vegetação excessiva	1,2	1
		Arraste de finos do núcleo	0,6	1
	Assentamentos excessivos	DCC	1,2	1
II.2	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (estrutura)	16,0	4
			16,0	4
			16,0	4
	Percolação excessiva (EF: 2)	Formações (fraturação)	0,8	1
II.3	Percolação excessiva	Alteração química	7,6	3
	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (estrutura)	7,6	3
	Percolação excessiva (EF: 1)	Formações (fraturação)	3,8	2
	Percolação excessiva (EF: 2)		0,8	1
II.4	Funcionamento do descarregador	BHD	11,6	4
	Colmatação dos poços	Arraste de finos para os poços	10,0	4
	Sedimentação dos poços	Arraste de finos para os poços	7,5	3
	Falha do sistema de bombagem	Falha do sistema de bombagem	2,4	1

BHD – balanço hidrológico desfavorável; DCC – deficiente controlo da compactação; EF: 1 – efeito final contaminação generalizada a jusante a longo prazo; EF: 2 – efeito final contaminações pontuais a jusante a longo prazo

A análise da Tabela 4.17 permite concluir que os modos de rotura que apresentam uma classe de risco intolerável são:

- *Piping*;
- Deslizamento profundo;
- Galgamento;
- Funcionamento do descarregador;
- Colmatação dos poços de drenagem.

Comum a todos estes modos de rotura está uma elevada severidade das consequências, sendo portanto normal surgirem como aqueles que necessitam de mais ponderação na etapa de controlo de riscos.

Com um nível de risco significativo (Tabela 4.17), que precisará também de especial atenção na etapa seguinte, estão os modos de rotura:

- Percolação excessiva através da estrutura geológica;
- Percolação excessiva devido à alteração química;
- Colmatação dos poços drenantes.

Existem diversos *software* que simplificam a tarefa de documentação, apresentação, avaliação e construção de diagramas e árvores usadas em certas análises de riscos, especialmente nos métodos FMEA/FMECA, FTA e ETA, tornando estas tarefas mais eficientes e simples. A título exemplificativo referem-se os seguintes *software* para auxílio à realização de uma ETA: *RAM Commander* e *ITEM Toolkit*. No entanto, devido ao carácter qualitativo desta avaliação de riscos, e com base nos *software* passíveis de ser utilizados neste contexto e no enquadramento desta dissertação, verificou-se que, dos programas testados, nenhum cumpria os requisitos pretendidos.

4.4 CONTROLO DE RISCOS

Nesta etapa serão referidas formas de controlar os riscos considerados significativos e intoleráveis por parte da avaliação de riscos. No entanto, serão apenas ilustradas de forma sintetizada, medidas de deteção, mitigação e prevenção para estes mesmos riscos. Sendo então excluídas as fases de elaboração do plano de emergência e da comunicação dos riscos, uma vez que a sua abordagem sairia do âmbito desta dissertação e tornariam esta análise demasiado extensa.

Apesar de não fazer parte do âmbito desta dissertação, importa referir que se parte do pressuposto que são cumpridos os trâmites legais e regulamentares exigidos. Neste sentido é exigida a constituição de um plano de emergência, cuja realização está regulamentada no RSB (2007) presente no decreto-lei nº 344/2007 de 15 de Outubro de 2007.

Ainda dentro das obrigações legais de um projeto deste tipo, será exigida a elaboração de uma avaliação de impacto ambiental (AIA). Este documento é considerado (Decreto-lei nº151-B/2013, 2013):

“Instrumento de carácter preventivo da política do ambiente, sustentado na realização de estudos e consultas, com efetiva participação pública e análise de possíveis alternativas, que tem por objeto a recolha de informação, identificação e previsão dos efeitos ambientais de determinados projetos, bem como a identificação e proposta de medidas que evitem, minimizem ou compensem esses efeitos, tendo em vista uma decisão sobre a viabilidade da execução de tais projetos e respetiva pós-avaliação”

Após a sua realização este documento deve ser remetido para a autoridade de AIA, que fará a preparação da proposta de declaração de impacto ambiental (DIA). A DIA pode ser favorável, favorável condicionada ou desfavorável, e irá conter os pareceres das entidades legalmente competentes sobre a conformidade do projeto, as condicionantes à realização do projeto, os estudos e elementos a apresentar, as medidas de minimização e compensação dos impactos ambientais negativos e os programas de monitorização a adotar (Decreto-lei nº151-B/2013, 2013).

No desenvolvimento das medidas de redução de riscos, a árvore de eventos deve ser revista para avaliar que eventos ou condições contribuem de forma mais relevante para o aumento da probabilidade de ocorrência ou das consequências da mesma (USBR, 2011).

Tal como referido na secção 2.4, as medidas de deteção visam identificar, numa fase inicial, a ocorrência de eventos iniciadores ou os seus efeitos imediatos. Com as medidas preventivas pretende-se prevenir a ocorrência do modo rotura, ou seja diminuir a sua verosimilhança, pertencendo às medidas mitigadoras o cargo de redução da severidade das consequências do modo de rotura.

Neste sentido, na Tabela 5.18 e 5.19 apresentam-se de forma concisa as medidas de controlo para a redução dos riscos considerados intoleráveis e significativos.

Tabela 4.18 - Medidas de controlo dos modos de rotura do caso de estudo

Subsist.	Modo de rotura	AI	Medidas de controlo		
			Deteção	Prevenção	Mitigação
II.1	Piping	Alteração química	Inspeção frequente da instrumentação instalada e do terreno a jusante para deteção de indicadores de repasses de fluidos	Adequado dimensionamento e controlo da construção do sistema de filtragem	Ativação do plano de emergência; Reforço da capacidade de bombagem
		Arraste de finos do núcleo			
		DCC			
	Deslizamento profundo	Vento forte	Reforço da inspeção visual (fissuração do coroamento) e instrumentação (deslocamentos superficiais)	Colocação de material adicional na proteção do MEM	Ativação do plano de emergência; Construção de uma berma estabilizadora no talude de jusante com a devida drenagem associada
		Vegetação excessiva		Controlo periódico da vegetação no talude de jusante	
		Arraste de finos do núcleo		Diminuição do volume de deposição dos rejeitados	
Galgamento	BHD	Manter o NAA e a precipitação e evaporação sob vigilância	Ativação do plano de emergência		
	Vento forte				
II.2	Percolação excessiva	Formações (estrutura)	Inspeção frequente da instrumentação instalada e do terreno a jusante para deteção de indicadores de repasses de fluidos	Impermeabilização da fundação – considerar cortina de impermeabilização por injeções de permeação de caldas de cimento	Reforço da capacidade de bombagem e/ou construção de poços adicionais
		Alteração química			
II.3	Percolação excessiva	Formações (estrutura)	Inspeção frequente da instrumentação instalada e do terreno a jusante para deteção de indicadores de repasses de fluidos	Construção de uma vala drenante ao longo da encosta	Reforço da capacidade de bombagem e/ou construção de poços adicionais;
		Alteração química			
II.4	Funcionamento do descarregador	BHD	Manter o NAA e a precipitação e evaporação sob vigilância	Diminuição do volume de deposição dos rejeitados; Alteamento artificial da soleira do descarregador por empilhamento de sacos de serradura e se necessário cobrir com geomembrana	Ativação do plano de emergência; Alteamento artificial da soleira do descarregador por empilhamento de sacos de serradura
II.5	Colmatção e sedimentação dos poços	Arraste de finos para os poços	Inspeção frequente da instrumentação instalada e do terreno a jusante para deteção de indicadores de repasses de fluidos	Apertar malha de inspeção e limpeza dos poços	Reforço da capacidade de bombagem e/ou construção de poços adicionais;

BHD – balanço hidrológico desfavorável; DCC – deficiente controlo da compactação;

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

Neste trabalho realizou-se um estudo do enquadramento geral da gestão de riscos em infraestruturas de armazenamento de resíduos mineiros, perspetivando-se os seus objetivos, os respetivos domínios de aplicação, as metodologias de avaliação de riscos disponíveis, medidas de controlo de risco, bem como a sua aplicação a um caso de estudo hipotético.

De seguida referem-se as principais considerações resultantes deste estudo e algumas linhas orientadoras da investigação subsequente no domínio em estudo.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O constante crescimento da consciência da sociedade atual quanto aos problemas ambientais e consequências decorrentes de acidentes tecnológicos graves, referindo ainda o importante papel da divulgação em tempo real realizado pela comunicação social e meios de informação atuais, fez com que existisse um incentivo adicional à divulgação dos conhecimentos e ao desenvolvimento de normas e regulamentação para reger o dimensionamento, exploração e manutenção das diversas obras de engenharia, nomeadamente através da aplicação de métodos de gestão de riscos aos casos associados a impactes mais gravesos.

Embora a aplicação correta de uma gestão de riscos não seja realizada na generalidade das obras de engenharia, a sua aplicação deveria tornar-se mais corrente, especialmente no caso das estruturas de retenção de resíduos mineiros, pelos riscos que acarretam. No entanto existem diversas metodologias de gestão de riscos, inteiramente estabelecidas noutras áreas científicas, que podem ser enquadradas nesta temática, com as devidas adaptações e validações, matéria para a qual esta dissertação procura contribuir.

Existe ao longo da realização desta dissertação a necessidade de separar os métodos de análise qualitativos e semi-quantitativos dos métodos quantitativos, o que se deve tanto às suas diferenças de aplicação, objetivo e modo de procedimento, como pelas diferentes dificuldades de aplicação associadas às suas utilizações.

No entanto, subsistem algumas semelhanças entre os métodos referidos: a sua capacidade de impor um conhecimento profundo das infraestruturas de aterro em análise, dos seus condicionantes locais e ambientais, das circunstâncias do seu dimensionamento, construção e exploração e das consequências de eventos referentes a todas essas fases.

A seleção do método a aplicar é também um passo que carece deliberação, dependendo dos objetivos impostos, da informação, tempo e orçamento disponíveis, e da equipa de especialistas e do nível de pormenor requerido e pretendido.

Os índices de riscos são métodos de aplicação simples e expedita, com aplicabilidade significativa em portfólios de barragens e na realização de análises de risco preliminares.

O método de diagramas de localização, causa e indicadores das falhas (LCI) tem como aplicação privilegiada barragens em exploração, uma vez que baseia a sua análise nas inspeções visuais executadas à estrutura e aos terrenos envolventes da obra.

A análise de perigos e operacionalidade (HAZOP) distingue-se pelo uso extensivo dos dados de observação do comportamento da barragem, beneficiando a sua aplicação a barragens em fase de exploração e com um plano de observação competente e bem definido.

A análise dos modos de rotura, seus efeitos (FMEA) e sua criticalidade (FMECA), reconhecida pelo seu carácter exaustivo, permitem um conhecimento profundo das condicionantes do projeto, podendo ser aplicada em qualquer fase de vida da obra e a qualquer sistema e subsistema. O mesmo acontece para a análise por árvores de eventos (ETA), que também pode ser adaptada à aplicação a barragens de rejeitados em qualquer fase de vida. No entanto a análise pormenorizada das sequências de eventos que culminam nos modos de rotura do sistema, dá à ETA a possibilidade de atuar de forma mais consciente e eficaz.

O método de análise por árvores de falhas (FTA), apesar de análogo à ETA no que diz respeito à utilização de árvores para análise, a sua construção é realizada na ordem inversa, dedutivamente, partindo do modo de rotura para o evento iniciador. Esta característica torna-o particularmente apropriado para a utilização em análises pós-acidente.

Um ponto da gestão de riscos em que se encontram algumas divergências na literatura da especialidade é relativa à apreciação de riscos. A influência significativa dos contextos políticos, culturais e sociais, dos diferentes países, na forma como o risco é entendido, tornam difícil o estabelecimento de um consenso, objetivo e global, quanto à aceitabilidade dos riscos, comprometendo de certa forma a eficácia e clareza com que estas medidas são aplicadas. Especialmente em Portugal, esta fase carece de alguma atenção, uma vez que é necessário complementar a regulamentação existente com o estabelecimento de limites para os níveis de tolerabilidade e aceitabilidade do risco, e de limites para a aplicação do princípio ALARP, diretamente associado a estes limites.

Neste contexto aplica-se uma análise de risco por ETA a uma barragem hipotética de rejeitados mineiros sulfuretados, que corresponde a um aterro zonado com cerca de 50 m de altura, instalada na Faixa Piritosa, em pleno Alentejo, numa zona de formações xistentas com algumas intercalações grauvacóides, dobradas e fraturadas. Após a conclusão do estudo efetuado foi

possível verificar e reforçar os benefícios da aplicação de uma gestão de riscos a barragens de rejeitados. Uma das vantagens é o conhecimento significativo adquirido no que diz respeito às condições da obra, uma vez que existe a necessidade de reunir toda a informação disponível sobre a mesma, possibilitando a indicação de áreas onde a informação é parca e/ou deficiente, promovendo a sua atualização e/ou a execução de estudos complementares.

Um dos principais benefícios e objetivos de uma gestão de risco é o apoio à tomada de decisão. Neste sentido, foi possível verificar que uma correta aplicação deste tipo de metodologia possibilita, especialmente no caso da ETA, o estabelecimento de relações entre os diferentes fatores externos e internos que atuam em todo o sistema e os efeitos imediatos e finais que os caracterizam. Este facto proporciona por sua vez, uma melhoria na eficácia do plano de observação, incluindo todos os elementos que o constituem, uma sensibilização do dono de obra e trabalhadores, dos riscos e suas consequências.

Todo o processo culmina com o estabelecimento de prioridades quanto à aplicação de medidas de controlo de risco, tendo sempre em conta os seus benefícios e custos inerentes, na intenção de reduzir a probabilidade de ocorrência e/ou a severidade das consequências de forma consciente.

Mais uma vez importa referir que, com a realização de uma análise por árvores de eventos (ETA), é conferida a possibilidade de atuar na redução de riscos de forma localizada, uma vez que são analisados todos os passos, desde a componente básica, onde o acontecimento iniciador é despoletado até ao modo de rotura do subsistema e/ou sistema, podendo a medida de prevenção ou mitigação ser aplicada em qualquer ramo da árvore, atenuando ou impedindo a progressão da sequência de eventos precocemente.

Relativamente à estrutura, foi possível chegar à conclusão que existem certos pontos na conceção de uma barragem, o seu dimensionamento, inspeção e observação do comportamento, requerem um cuidado especial, nomeadamente pelas consequências que advém da perda da funcionalidade de certas componentes. Destaca-se a importância do sistema de filtragem e drenagem, do controlo da compactação dos aterros, da deteção de percolação excessiva – tanto pelas inspeções visuais como pela instrumentação, e do correto dimensionamento e selecção dos períodos de retorno utilizados.

No entanto, foram encontrados alguns obstáculos que necessitam de desenvolvimento para que a aplicação deste tipo de práticas possa ser efetuada de forma sistemática, particularmente no caso das análises de riscos quantitativas. A complexidade já referida das barragens de rejeitados e as suas incertezas tornam difícil o processo de atribuição de probabilidades, solicitado pelo processo de análise quantitativo, a todos os eventos de um sistema complexo que uma estrutura do tipo, na maioria dos casos, representa.

Inerente a qualquer tipo de análise em que seja requerido um nível de complexidade significativo, é exigido uma equipa multidisciplinar para identificar e analisar os diversos acontecimentos iniciadores que podem, através de uma sequência de eventos, eventualmente, chegar a um modo de rotura, lidando neste processo com todas as incertezas inerentes. Este facto torna a aplicação destas metodologias, especialmente nos métodos quantitativos, dispendiosa e morosa.

Concretamente, na aplicação de uma gestão de riscos ao caso de estudo desta dissertação foram encontrados obstáculos como:

- a dificuldade de reunir a informação necessária para a sua aplicação;
- a dificuldade de identificar os acontecimentos iniciadores;
- a necessidade de fazer certas simplificações para tornar a sua realização possível;
- a complexidade de minimizar a subjetividade inerente à atribuição de classes, à verosimilhança e à severidade das consequências.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em termos de desenvolvimentos futuros propõem-se, em seguida, algumas linhas orientadoras para investigações ulteriores no domínio em referência, a saber:

- Aprofundamento do estudo e implementação da análise semi-quantitativa por árvores de eventos (ETA), apresentada nesta dissertação, a casos de estudo reais;
- Aprofundamento do estudo e elaboração de análises de risco utilizando, conjuntamente, o método de análise por árvores de eventos (ETA) e por árvores de falhas (FTA) a casos de estudo reais;
- Aprofundamento do estudo e elaboração de análises de risco quantitativas a subsistemas específicos de uma barragem de rejeitados;
- Criação de uma base de dados de modo a sistematizar os acontecimentos iniciadores associados a barragens, principalmente, em barragens de retenção de rejeitados;
- Criação de uma base de dados de modo a sistematizar os modos de rotura de barragens, principalmente, em barragens de retenção de rejeitados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCOLD, 1999. *Guidelines on tailings dam design, construction and operation*. Australian National Committee On Large Dams: October.
- Azam, S. & Li, Q., 2010. Tailings Dam Failures: A review of the past one hundred years. *Waste GeoTechnics*.
- Barker, M., 2011. *Australian risk approach for assesement of dams*, Australia: GHD.
- Cândido, M. A. F., 2010. *Contributo para a gestão do risco geotécnico na construção de túneis*. Lisboa: Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Geológica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- CNPGB, 2005. *Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens: 1º Relatório de Progresso (Janeiro 2005)*, Lisboa: Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens.
- CNPGB, 2006. *Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens: 2º relatório de progresso*, Lisboa: Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens.
- Decreto-lei nº 10/2010, 2010. *4 de Fevereiro. Ministério do Ambiente e do Ordenamento*, 1.ª série — N.º 24: Diário da República.
- Decreto-lei nº151-B/2013, 2013. *31 de Outubro, Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território*, 1.ª série — N.º 211: Diário da República.
- Faber, M., 2001. *Risk and safety in civil engineering*. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich: Institute of Structural Engineering.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D. & Bell, G., 2015. *Geotechnical Engineering of Dams*. 2ª ed. London: CRC Press/Balkema.
- Gajewska, E. & Ropel, M., 2011. *Risk management practices in a construction project - a case study*, Göteborg: Master of Science Thesis in the Master's Programme Design and Construction Project Management. Chalmers University of Technology.
- ICOLD, 2001. *Tailings Dams - Risk of Dangerous Ocurrences, Lessons learnt from practical experiences*. International Commission On Large Dams: Bulletin 121.
- ICOLD, 2005. *Risk assessment in dam safety management, A reconnaissance of benefits, methods and current applications*. International Commission On Large Dams: Bulletin 130.
- IEC, 2001. *Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide*. International Electrotechnical Commission: 61882.

- Matos, J. & Martins, L., 2006. *Reabilitação ambiental de áreas mineiras do sector português da Faixa Piritosa Ibérica: estado de arte e perspectivas futuras*, Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- McDonald, L., 2007. *Tolerable risk criteria: The ANCOLD guidance*, Australia: ANCOLD Working Group on Risk Assessment.
- McLeod, H. & Murray, L., 2003. Tailings dam versus a water dam, what is the design difference?. *ICOLD Symposium on Major Challenges in Tailings Dams*, 15 June, p. 12.
- Middelmann, M., 2007. *Natural hazards in Australia, Identifying risk analysis requirements*. Canberra: Geoscience Australia.
- Morris, M., Hewlett, H. & Elliott, C., 2000. *Risk and reservoirs in the UK*, London: CIRIA.
- NASA, 2002. *Fault tree handbook with aerospace applications*, Washington: NASA Office of Safety and Mission Assurance.
- NP EN 1990, 2009. *Eurocódigo, Bases para o projecto de estruturas*. Caparica: CT 115. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1997-1, 2010. *Eurocódigo 7, Projecto Geotécnico*. Caparica: CT115, Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 206-1, 2007. *Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*, Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- Passos, N. C. d. S. T., 2009. *Barragem de rejeito: Avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeitos de minério de ferro utilizando ensaios de campo - um caso de estudo*. Curitiba: Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná.
- Pimenta, L., 2008. *Abordagens de riscos em barragens de aterro*, Lisboa: Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa.
- Rico, M. et al., 2007. Reported tailings dam failures - A review of the European incidents in the worldwide context. *ScienceDirect*, p. 7.
- Robertson, A., Mac, G. & Shaw, S., 2003. *Risk management for major geotechnical structures on mines*. Calgary, Robertson GeoConsultants Inc..
- RSB, 1993. *Normas de observação e inspecção de barragens (NOIB)*. Portaria nº847/93, 10 de Setembro, Subcomissão dos Regulamentos das Barragens.
- RSB, 2007. *Regulamento e segurança de barragens*. Decreto-lei nº344/2007, 15 de Outubro, Subcomissão dos Regulamentos das Barragens.

- Santos, E. et al., 2010. Evolução geoquímica dos lixiviados de materiais de escombreira ricos em sulfuretos em ensaios de reabilitação. *Revista Electrónica de Ciências da Terra*, 9(GEOTIC - VIII Congresso Nacional de Geologia), p. 4.
- Santos, R. N. C. d., 2006. *Enquadramento das análises de riscos em geotecnia*. Lisboa: Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- USACE, 2012. *Risk Guidelines*. Washington: U.S. Army Corps of Engineers.
- USBR, 2011. *Dam safety public protection guidelines*. Denver, Colorado: U.S. Departmente of the Interior.
- USCG, 2000. *Risk-based decision-making guidelines - Volume 3. U.S. Coast Guard - Procedures for assessing risks*. [Online] Available at: <http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/risk.asp> [Accessed 14 Maio 2015].
- USEPA, 1994. *Technical report: Design and evaluation of tailings dams*, Washington: U.S. Environmental Protection Agency.
- Veiga Pinto, A., 2008. Gestão de riscos e segurança de barragens. *3º Simpósio de segurança de barragens e riscos associados. Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.
- Viseu, T. & Almeida, A., 2011. *Gestão do risco nos vales a jusante de barragens*. 18 ed. Coimbra: Associação Portuguesa de Risco, Prevenção e Segurança.

ANEXOS

Anexo A – Glossário (adaptado CNPGB, 2005)

Termo	Definição
Aceitação do risco	Uma decisão informada para aceitar a verosimilhança e as consequências de um risco particular.
Análise de riscos	A utilização da informação disponível para estimar o risco relativamente a indivíduos ou populações, a bens ou ao ambiente, devido a perigos. A análise de riscos contém geralmente as seguintes fases: definição do âmbito, identificação de perigos e estimativa do risco.
Análise qualitativa de risco	Uma análise que usa forma escrita, descritiva ou escalas de ordenação numérica para descrever a grandeza de consequências potenciais e a verosimilhança da ocorrência dessas consequências.
Análise quantitativa de risco	Uma análise, baseada em valores numéricos, das consequências potenciais e da verosimilhança, pretendendo-se que tais valores sejam uma representação válida da grandeza real das consequências e da probabilidade dos vários cenários que são examinados.
Apreciação do risco	O processo de ponderação e julgamento do significado do risco.
Apreciação qualitativa do risco	Uma apreciação baseada numa análise qualitativa do risco.
Apreciação quantitativa do risco	Uma apreciação baseada em análises quantitativas do risco.
Avaliação do risco	O processo de tomada de uma decisão/recomendação sobre se os riscos existentes são toleráveis e se as medidas de controlo do risco atuais são adequadas, e se não, sobre se as medidas alternativas de controlo do risco são justificadas ou serão implementadas.
Cenário de rotura	Combinação única de circunstâncias, tais como: evento iniciador; velocidade do vento; nível de água na albufeira; posicionamento das comportas; modo de rotura;
Consequências	No que se refere às análises de riscos, resultados de um risco se concretizar.
Controlo do risco	A implementação e a imposição de medidas para manter ou reduzir o risco e a reavaliação periódica da sua eficácia.
Curvas F-N	Curvas que relacionam F (a probabilidade anual de causar N ou mais mortes) com N. Esta é a função de distribuição complementar cumulativa.
Dano potencial	Consequências associadas a um acontecimento adverso, independentemente da probabilidade da sua ocorrência.
Dono de Obra	Entidade legal – indivíduo, empresa, organização, departamento do Estado, Empresa pública, Corporação ou outra – detentora de uma licença governamental para a exploração da barragem ou do título de propriedade legal do local da barragem e/ou albufeira e que é responsável pela sua segurança.
Efeitos	No contexto da análise dos modos de rotura (FMEA e FMECA), este termo refere-se às consequências para o funcionamento de um sistema, nomeadamente uma barragem, de uma falha em alguns dos seus componentes.
Evento extremo	Evento que tem uma probabilidade de excedência anual (AEP) muito pequena.
Gestão do risco	Aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de identificação, análise, apreciação, avaliação, mitigação e controlo do risco.
Identificação do risco	Processo de identificação do que pode falhar (correr mal), porquê e como.
Incerteza	Presentemente é usada para descrever qualquer grandeza ou situação sem certeza, seja ou não descrita por uma distribuição de probabilidades.

Termo	Definição
Limite	No que se refere ao nível de risco é o nível que, quando excedido, é inaceitável.
Limite de tolerabilidade	Valores acima dos quais o risco associado a um acontecimento adverso é considerado inaceitável, sejam quais foram os benefícios associados à infraestrutura, atividade ou prática potencialmente geradora desse acontecimento, a menos que subsistam razões excepcionais para que as referidas infraestrutura, atividade ou prática devam ser mantidas.
Mecanismos de rotura	Um mecanismo descrito pelos processos e estados físicos que devem ocorrer de acordo com as leis da natureza que regem a progressão do modo de rotura, desde a causa iniciadora até à realização do efeito último da rotura em análise.
Modo de rotura	O modo como a rotura pode ocorrer, descrito pelos processos como as falhas dos elementos ou componentes devem ocorrer para provocar a perda de funcionalidade dos sistemas ou subsistemas em análise.
Par f, N	Diz respeito a f, a probabilidade de perda de vidas humanas devido a cada cenário em estudo de rotura da barragem, e N o número de vítimas mortais expetáveis para esse cenário de rotura.
Perda	Qualquer consequência negativa, de carácter financeiro ou outro.
Perigo	Ameaça. Condição, que pode resultar tanto de uma causa externa (<i>e.g.</i> sismo, cheia ou causa humana) como ser devida a uma qualquer vulnerabilidade interna com o potencial para iniciar o modo de rotura. Uma fonte de danos potenciais ou uma situação com o potencial para provocar perdas.
Plano de emergência	Documento que contém os procedimentos para enfrentar diversas situações de emergência, os esquemas de comunicação e os mapas de inundação com a indicação de níveis de água, a montante e a jusante, e os tempos de chegada de cheias que podem resultar da rotura da barragem ou dos seus órgãos de segurança e exploração.
População em risco (PAR)	Todos os indivíduos que, caso não sejam evacuados, serão atingidos pela onda de inundação provocada por uma rotura na barragem.
Princípio ALARP (<i>As Low As Reasonably Practicable</i>)	Princípio metodológico que estabelece que os riscos, inferiores ao limite de tolerabilidade, só são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a essa redução forem fortemente desproporcionados (dependendo do nível do risco) relativamente aos benefícios daí decorrentes.
Processo de decisão	O processo global, estruturado ou não, necessário para chegar a uma decisão.
Rotura de barragem	No caso geral, a perda de capacidade de uma barragem, ou de parte dela, de funcionar como previsto.
Sistema	Um sistema é uma entidade definida constituída por elementos discretos identificáveis e inter-atuantes. É um arranjo ordenado destes elementos (por exemplo, área limitada espacialmente, estruturas, componentes de equipamentos mecânicos e elétricos e operadores) concebido para evidenciar as interações entre os vários elementos no desempenho da função do sistema.
Verosimilhança	Utilizada como ma descrição qualitativa da probabilidade e frequência.

Anexo B – Fatores de apreciação das condições de risco (RSB, 1993)

i α	Associados a fatores exteriores ou ambientais (E)					Associados à barragem – Fiabilidade (F)				Associados a fatores humanos e económicos (R)	
	Sismicidade (período de retorno 1000 anos)	Escorregamento taludes (probabilidade)	Cheias superiores à do projeto (probabilidade)	Gestão da albufeira	Ações agressivas (clima, água, etc.)	Dimensionamento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Manutenção	Volume da albufeira (m ³)	Instalações a jusante
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Mínima ou ula ($a < 0,05g$)	Mínima ou ula	Muito baixa (barragens de betão)	Plurianual, anual ou sazonal	Mínimas	Adequado	Muito boas	Fiáveis	Muito boa	$< 10^5$	Zona não habitada, sem valor económico
2	Baixa ($0,05g < a < 0,1g$)	Baixa	-	-	Fracas	-	Boas	-	Boa	$10^5 - 10^6$	Áreas isoladas. Agricultura
3	Baixa ($0,1g < a < 0,2g$)	-	Muito baixa (barragens de aterro)	Semanal	Médias	Aceitável	Aceitáveis	-	Satisfatória	$10^6 - 10^7$	Pequenos aglomerados populacionais, agricultura, indústria artesanal
4	Forte ($0,2g < a < 0,4g$)	-	-	Diária	Fortes	-	-	-	-	$10^7 - 10^9$	Aglomerados, populacionais médios, pequenas indústrias
5	$a > 0,4g$	-	-	Bombagem	Muito fortes	-	Medíocres	-	-	$> 10^9$	Grandes aglomerados populacionais, indústrias, instalações nucleares
6 (a)	-	Grande	Elevada	-	-	Inadequado	Medíocres a más	Insuficientes, não operacionais	Insatisfatória	-	-

(a) Condições anormais – intervenção técnica indispensável

Anexo C - Avaliação das perdas económicas e estimativa do número de pessoas em perigo (*Hughes et al., 2000 apud Pimenta, 2008*)

Tipo 1 – Zonas residenciais				Tipo 5 – Áreas industriais		
Importância das perdas	Número de habitações afetadas	Classificação	PAR	Importância das perdas	Tipo de área industrial afetada	Classificação
Nenhuma	0	0	0	Nenhuma	-	0
Pequena	1 a 15	1	30	Pequena	Artesanal	1
Média	16 a 50	2	100	Média	Associadas à saúde pública	2
Elevada	51 a 250	3	500	Elevada	Perímetros industriais	3
Muito Elevada	>250	4	2x número habitações	Muito Elevada	Indústrias perigosas	4
Tipo 2 – Zonas construídas não residenciais ¹				Tipo 6 – Redes de abastecimento ²		
Importância das perdas	Número de pessoas afetadas	Classificação	PAR	Importância das perdas	Tipo de redes afetadas	Classificação
Nenhuma	0	0	0	Nenhuma	-	0
Pequena	1 a 150	1	150	Pequena	Local (distribuição)	1
Média	151 a 500	2	500	Média	Local (origem e distribuição)	2
Elevada	501 a 1000	3	1000	Elevada	Regionais	3
Muito Elevada	>1000	4	Número pessoas	Muito Elevada	Nacionais	4
Tipo 3 – Vias de comunicação				Tipo 7 – Áreas agrícolas e habitats naturais		
Importância das perdas	Tipo de vias afetadas	Classificação	PAR	Importância das perdas	Tipo de área afetada	Classificação
Nenhuma	-	0	0	Nenhuma	Não cultivada	0
Pequena	Caminhos e estradas municipais	1	25	Pequena	Pastagens	1
Média	EN, IC, linhas ferroviárias principais	2	50	Média	Agricultura dispersa	2
Elevada	IP, linhas ferroviárias principais	3	100	Elevada	Agricultura intensa, habitats naturais, património nacional	3
Muito Elevada	AE, TGV, aeroportos	4	Estimativa	Muito Elevada	Habitats protegidos, património mundial	4
Tipo 4 – Áreas recreativas				Legenda: 1 – Escolas, lojas, empresas, etc. 2 – Água, gás, eletricidade, etc. EN – Estrada Nacional IC – Itinerário Complementar IP – Itinerário Principal AE – Autoestrada TGV – Linha ferroviária de alta velocidade		
Importância das perdas	Número de pessoas afetadas	Classificação	PAR			
Nenhuma	0	0	0			
Pequena	1 a 10	1	10			
Média	11 a 50	2	50			
Elevada	51 a 100	3	100			
Muito Elevada	>100	4	Nº pessoas			